

**PENGARUH PENCAMPURAN SEMIKONDUKTOR TiO_2 DENGAN
 ZnO TERHADAP KINERJA DSSC (*DYE SENSITIZED SOLAR CELL*)**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

JUDUL SKRIPSI:

PENGARUH PENCAMPURAN SEMIKONDUKTOR TiO_2 DENGAN ZnO TERHADAP KINERJA DSSC (*DYE SENSITIZED SOLAR CELL*)

Nama Mahasiswa : Falih Perkasa
NIM : 145060201111033
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Konversi Energi

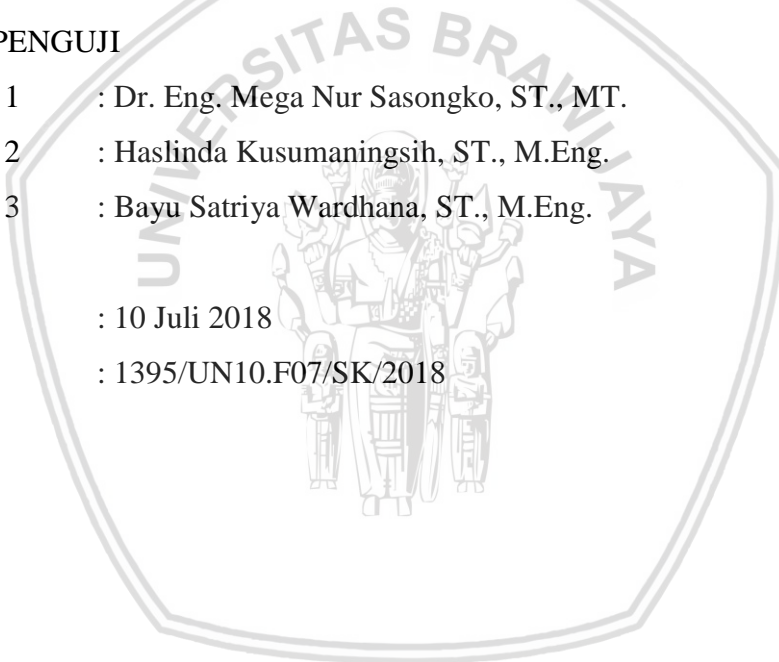
KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr. Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST., MT.
Pembimbing II : Redi Bintarto, ST., M.Eng.Pract

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
Dosen Penguji 2 : Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng.
Dosen Penguji 3 : Bayu Satriya Wardhana, ST., M.Eng.

Tanggal Ujian : 10 Juli 2018
SK Penguji : 1395/UN10.F07/SK/2018



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkat rahmat dan hidayah-Nya serta sholawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Pencampuran Semikonduktor TiO₂ dengan ZnO Terhadap Kinerja DSSC (*Dye Sensitized Solar Cell*)”. Skripsi ini dibuat untuk memenuhi syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, akan tetapi diharapkan segala usaha yang telah dilakukan dapat menjadi ilmu yang bermanfaat.

Selama proses penulisan dan penyelesaian skripsi ini, penulis banyak memperoleh bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tanpa bantuan dan dukungan yang didapat tidak mungkin skripsi ini dapat terselesaikan. Untuk itu penulis dengan tulus hati ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT.,Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
2. Bapak Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Ibu Dr.Eng. Widya WIjayanti, ST., MT. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Dr.Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST.,MT. selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan banyak bimbingan, bantuan, serta ilmu dalam penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Redi Bintarto, ST., M.Eng.Pract. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan banyak bimbingan, bantuan, serta ilmu dalam penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan banyak bantuan dan motivasi serta ilmu dalam penyusunan skripsi ini.
7. Bapak Dr. Zainal Arifin, S.T.,M.T. selaku Dosen Pembimbing di Laboratorium Nano Bio Energi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta.

8. Staf dari Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah meluncurkan proses dari skripsi ini.
9. Kedua orang tua serta adik dan kakak dari penulis yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta doa yang tak terhingga sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
10. Teman-teman M'14 yang namanya tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah memberikan dukungan dan bantuannya selama penyelesaian skripsi ini.
11. Teman dekat sekaligus pendamping saya Anisa Noor Afifa yang selalu memberikan semangat dan motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini.
12. Teman-teman KGDM SQUAD yang selalu membantu menghilangkan rasa bosan saat pengerjaan skripsi.
13. Teman-teman seperjuangan Dwiki, Imam, Yunus, dan Farhan yang telah membantu menyelesaikan skripsi ini.
14. Rekan-rekan asisten Laboratorium Tenaga Surya dan Energi Alternatif FT-UB : Adul, Husni, Pram, Arip, Naufal, Apoy dan Tari yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini.
15. Rekan-rekan asisten Laboratorium Nano Bio Energi FT-UNS : Heru, Hasbi, Mas Catur dan Singgih yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini.
16. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, semoga amal, bantuan, bimbingan dan doa yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan dari Allah SWT. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik yang bersifat membangun sangat di harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini bermanfaat bagi kita semua. Amin.

Malang, 06 Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|------------|
| KATA PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI | iii |
| DAFTAR TABEL | v |
| DAFTAR GAMBAR | vi |
| RINGKASAN..... | vii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 5 |
| 1.3 Batasan Masalah | 5 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 5 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 5 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 7 |
| 2.1 Penelitian Sebelumnya..... | 7 |
| 2.2 Energi Surya | 9 |
| 2.3 Dye-sensitized solar cell (DSSC) | 10 |
| 2.3.1 Prinsip Kerja DSSC..... | 11 |
| 2.3.2 Karakteristik DSSC | 12 |
| 2.3.3 Material DSSC | 14 |
| 2.4 Hipotesa | 18 |
| BAB III METODE PENELITIAN..... | 19 |
| 3.1 Metode Penelitian | 19 |
| 3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan | 19 |
| 3.3 Variabel Penelitian..... | 19 |
| 3.4 Alat dan bahan yang Digunakan | 19 |
| 3.5 Instalasi Penelitian | 28 |

| | |
|---|-----------|
| 3.6 Prosedur Penelitian | 29 |
| 3.7 Prosedur Pembuatan Model | 29 |
| 3.8 Diagram Alir Penelitian | 34 |
| BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN | 35 |
| 4.1 Analisa Hasil XRD | 35 |
| 4.2 Analisa Hasil SEM | 37 |
| 4.3 Analisa Hasil Uji Solar Simulator | 38 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 41 |
| 5.1 Kesimpulan | 41 |
| 5.2 Saran | 41 |
| DAFTAR PUSTAKA | |
| LAMPIRAN | |



DAFTAR TABEL

| No. | Judul | Halaman |
|-----------|--|---------|
| Tabel 1.1 | Sumber Daya Energi Terbarukan | 1 |
| Tabel 2.1 | Panjang Gelombang Cahaya Tampak | 10 |
| Tabel 4.1 | Hasil Perhitungan dengan Persamaan (3-1) | 36 |
| Tabel 4.2 | Hasil Uji Solar Simulator | 39 |



DAFTAR GAMBAR

| No. | Judul | Halaman |
|-----|---|---------|
| | Gambar 2.1 Struktur DSSC..... | 11 |
| | Gambar 2.2 Skema prinsip kerja dari DSSC..... | 12 |
| | Gambar 2.3 Kurva arus-tegangan..... | 13 |
| | Gambar 3.1 Magnetic Stierer..... | 21 |
| | Gambar 3.2 Timbangan Digital..... | 22 |
| | Gambar 3.3 Nebulizer | 23 |
| | Gambar 3.4 Gelas Ukur 100ml (a), Gelas Kimia 1000ml (b), Kaca Vial (c) | 23 |
| | Gambar 3.5 Kaca 20 mm X 20 mm X 3 mm | 24 |
| | Gambar 3.6 <i>Thermocouple</i> (a) dan <i>Temperature Controller</i> (b) | 24 |
| | Gambar 3.7 <i>Furnace</i> | 24 |
| | Gambar 3.8 <i>Rotary Evaporator</i> | 25 |
| | Gambar 3.9 Lampu Halogen (a), Mesin <i>Keithley</i> (b), <i>Pyranometer</i> (c) | 25 |
| | Gambar 3.10 Tin (II) Chloride ($\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)..... | 26 |
| | Gambar 3.11 <i>Amonium Fluoride</i> (NH_4F)..... | 26 |
| | Gambar 3.12 TiO_2 (nanopowder, 21nm <i>Sigma-Aldrich</i>) (a) dan ZnO teknis (b)..... | 27 |
| | Gambar 3.13 Asetonitril 99% (a), Ethanol 96% (b), Akuades (c) | 27 |
| | Gambar 3.14 Pewarna <i>Curcumin</i> | 28 |
| | Gambar 3.15 DSSC | 28 |
| | Gambar 3.16 Instalasi Penelitian..... | 28 |
| | Gambar 3.17 Diagram Alir Penelitian..... | 34 |
| | Gambar 4.1 Hasil Uji XRD TiO_2/ZnO | 35 |
| | Gambar 4.2 Standart TiO_2 (a), Standart ZnO (b) | 36 |
| | Gambar 4.3 Hasil Uji SEM material TiO_2/ZnO (a), TiO_2 (b) | 37 |
| | Gambar 4.4 Karakteristik DSSC | 38 |

RINGKASAN

Falih Perkasa, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2018, *Pengaruh Pencampuran Semikonduktor TiO_2 dengan ZnO Terhadap Kinerja DSSC (Dye Sensitized Solar Cell)*, Dosen Pembimbing: Denny Widhiyanuriyawan, Redi Bintarto

Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) merupakan alat yang mampu mengubah energi surya menjadi energi listrik dengan elektrolit sebagai medium transport muatan menggunakan prinsip fotoelektrokimia. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengurangi penggunaan Bahan Bakar Minyak (BBM) dan bisa menjadi sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. Dalam penelitian ini akan dicampurkan material ZnO ke dalam semikonduktor TiO_2 dengan perbandingan massa 2:1 dan dibandingkan dengan semikonduktor murni TiO_2 . Hasil penelitian akan diuji ukuran kristalnya dengan menggunakan perangkat XRD dimana ukuran kristal yang didapat dari campuran TiO_2/ZnO sebesar 16,286 nm. Lalu diuji SEM untuk mengetahui struktur morfologi partikelnya serta dilakukan pengujian karakteristik DSSC. Hasil yang didapat dari uji SEM yaitu bentuk partikel campuran TiO_2/ZnO adalah bulat. Dari hasil penelitian menunjukkan pencampuran TiO_2/ZnO dapat menghasilkan arus *short circuit* (I_{sc}) lebih besar dibandingkan hanya menggunakan TiO_2 saja dibuktikan dengan hasil dari uji solar simulator. Hasil dari solar simulator menunjukkan efisiensi yang dihasilkan oleh campuran TiO_2/ZnO sebesar 0,199% dan untuk semikonduktor TiO_2 saja sebesar 0,083%. Jadi semakin tinggi arus yang dihasilkan maka efisiensi juga akan semakin besar pula.

Kata Kunci: *Dye Sensitized Solar Cell, TiO_2 , ZnO*



SUMMARY

Falih Perkasa, *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, June 2018, Effect of Mixing Semiconductor TiO_2 with ZnO on DSSC (Dye Sensitized Solar Cell) Performance, Academic Supervisor : Denny Widhiyanuriyawan, Redi Bintarto*

Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) is a tool capable of converting solar energy into electrical energy by electrolyte as transportation medium using photoelectrochemical principle. The purpose of this study is to reduce the use of fuel oil (BBM) and can be an environmentally friendly alternative energy. In this study ZnO material will be degraded into TiO_2 semiconductors with a ratio mass of 2:1 and compared with pure semiconductor TiO_2 . The results will be done using XRD where the crystal size obtained from $\text{TiO}_2 / \text{ZnO}$ mixture is 16,286 nm. Then press SEM to find out the particle morphology structure and do it on the DSSC. Results obtained from the SEM test that is the form of mixture of $\text{TiO}_2 / \text{ZnO}$ is rounded. From the results of the research show that mixing $\text{TiO}_2 / \text{ZnO}$ can produce short current (I_{sc}) is greater than just using TiO_2 alone is proved by the results of the solar simulator test. The results of the solar simulator show the efficiency produced by the $\text{TiO}_2 / \text{ZnO}$ mixture of 0.199% and for the TiO_2 semiconductor alone by 0.083%. So the higher the resulting efficiency will also be greater.

Keywords: *Dye Sensitized Solar Cell, TiO_2 , ZnO*



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Akhir-akhir ini krisis energi sudah menjadi isu global yang melanda hampir seluruh belahan dunia. Kebutuhan sumber daya energi seperti : batu bara, minyak bumi, dan gas di dunia semakin meningkat karena daya serap pada sektor, industri, transportasi, rumah tangga, dan lain-lain. Sehingga perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi sekarang meneliti untuk mendapatkan sumber energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan.

Salah satu sumber energi alternatif itu adalah energi matahari. Keuntungan dari energi surya adalah dapat diperoleh secara gratis di alam. Hal ini disebabkan karena sumber persediaan energi surya bersumber dari matahari, tanpa polusi dan emisi gas sehingga dapat mengurangi pemanasan global (Setiawan, 2014). Indonesia adalah salah satu negara yang berada di daerah khatulistiwa, secara teoritis akan selalu disinari matahari selama 10-12 jam sehari dan hampir seluruh wilayahnya mendapatkan intensitas penyinaran yang merata.

Tabel 1.1

Sumber Daya Energi Terbarukan

| No | Jenis Energi | Sumber Daya | Cadangan | Potensi | Kapasitas |
|----|---------------------|------------------------------|----------|-----------|-------------|
| 1 | Panas Bumi | | | 29.544 MW | 1.438,5 MW |
| 2 | Hidro | 75.091 MW | | 45.379 MW | 8.671 MW |
| 3 | Mini-mikrohidro | | | 19,385 MW | 2.600,76 KW |
| 4 | Biomassa | 32.654 MWe | | | 91,1 MW |
| 5 | Energi Surya | 4,8 kWh/m ² /hari | | | 14.006,5 KW |
| 6 | Energi Angin | 970 MW | | | 1,96 MW |
| 7 | Uranium | 3.000 MW | | | 30 MW |
| 8 | Shale Gas | 574 TSCF | | | |
| 9 | Gas Metana Batubara | 456,7 TSCF | | | |
| 10 | Gelombang Laut | 17,989 MW | | | |
| 11 | Energi Panas Laut | 41.012 MW | | | |
| 12 | Energi Pasang Surut | 4.800 MW | | | |

Sumber : Badan Pengkajian Dan Penerapan Teknologi (BPPT) (2017,p.20)

Dari Tabel 1.1 terlihat bahwa potensi yang dimiliki Indonesia dari sumber energi surya sebesar $4,8 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ atau setara dengan 112.000 GW. Sampai saat ini pemanfaatan energi surya untuk menghasilkan listrik mencapai 14.006,5 kW (BPPT, 2017). Seiring jalannya waktu, teknologi sel surya pun mengalami perkembangan yang cukup pesat. Salah satu teknologi yang digunakan adalah *Dye-sensitized solar cell* (DSSC). *Dye-sensitized solar cell* merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip elektrokimia dimana zat pewarna yang terserap pada lapisan fotoelektroda TiO_2 akan menangkap energi foton yang berasal dari matahari (Flores, dkk, 2007).

Beberapa penelitian telah mengambil topik tentang DSSC, pada penelitian yang telah dilakukan oleh Wu, dkk pada tahun 2006 dimana *dye solar cell* difabrikasi menggunakan pewarna alami. Pewarna alami yang digunakan yaitu *black rice*, *capsicum*, *erythrina*, *variegata flower*, *rosa xanthine* dan *kelp* yang telah di ekstrak. Hasilnya adalah ekstrakan dari *black rice* yang memiliki kualitas terbaik dari tumbuhan yang lain. Kerapatan arus, tegangan *open-circuit*, *fill factor* dan daya dari DSSC menggunakan ekstrak *black rice* yang didapatkan adalah 1.142 mA, 551 mV, 0.52 dan 327 μW

Faiz, M. R, dkk (2017) melakukan penelitian tentang pengaruh pelarut pada pewarna klorofil untuk *Dye Sensitized Solar Cell*. Perhitungan mekanisme kuantum dihasilkan menggunakan program ORCA dan optimasi geometri dihitung menggunakan DFT dengan def2-TZVP basis set yang di aplikasikan untuk pewarna klorofil dengan semua pelarut. DFT dihitung menggunakan B3LYP *Density* yang mana mencakup tiga parameter fungsi Becke dengan parameter Lee-Yang-Parr. Jadi, untuk menunjukkan keadaan tereksitasi dan properti optik, untuk memproduksi spektrum absorbansi UV-Vis, *Time Dependent-Density Functional Theory* (TD-DFT) metode yang diikutsertakan pada B3LYP dengan basis set menggunakan def2-TZVP untuk transisi elektron diantara keadaan HOMO dan LUMO. Pada perhitungan menggunakan algoritma RIJCosX. Karakteristik dari konvergensi SCF dan untuk memperbaiki integrasi jaringan digunakan Grid5, Grid6 untuk semua perhitungan. Pelarut yang disimulasikan yaitu gas, aseton, asetonitril, ethanol, hexana, methanol, air, THF, dan DMSO dan hasil energi Bandgap yang dihasilkan berturut-turut : 1,715eV; 1,483eV; 1,472eV; 1,48eV; 1,645eV; 1,474eV; 1,463eV; 1,528eV; 1,468eV

Pada penelitian Souad, dkk pada tahun 2013 merakit *dye-sensitized solar cell* (DSSC) menggunakan daun *lawsonia inermis*, buah *sumac/rhus* dan akar *curcuma longa* sebagai pewarna alami. Elektrolit lapisan tipis yang padat terdiri dari campuran 50 wt% *chitosan* dan 50 wt% *polyethylene oxide*. Campuran polimer kompleks dengan *ammonium*

iodide (NH_4I) dan beberapa kristal *iodine* dicampur pada larutan polimer NH_4I untuk memperoleh pasangan *redoks* I^-/I_3^- . Pada temperatur ruangan konduktifitas ion dari elektrolit polimer didapatkan $1.18 \times 10^{-5} \text{ S cm}^{-1}$. Untuk pewarna dari buah *sumac/rhus* didapatkan efisiensi maksimal, tegangan *open-circuit*, dan *fill factor* adalah 1.5%, 394 mV, 0.93 mA/cm^2 dan 0.41. Untuk pewarna dari daun *lawsonia inermis* didapatkan efisiensi maksimal, tegangan *open-circuit*, dan *fill factor* adalah 0.7%, 336 mV, 0.38 mA/cm^2 dan 0.57. Untuk pewarna dari akar *curcuma longa* didapatkan efisiensi maksimal, tegangan *open-circuit*, dan *fill factor* adalah 0.36%, 280 mV, 0.2 mA/cm^2 dan 0.65.

Faiz, M. R, dkk (2017) melakukan *study* tentang aplikasi dari pigmen hijau yang berasal dari alam untuk *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC). Dengan menggunakan metode perhitungan DFT dan TD-DFT agar mampu memecahkan struktur elektronik dan sifat optik dalam menganalisis pigmen hijau alami sebagai sensitizer untuk pewarna sensitizer sel surya. Telah ditemukan bahwa dalam langkah *photoexcitation*, pewarna menyajikan transisi elektronik HOMO sebesar -4,8eV dan LUMO sebesar -4,0eV dari *tetrapyrroles* kepada kelompok penahan, yang menjelaskan peran signifikan dari klorofil ini dalam proses panen sel surya. Telah ditemukan juga UV-Vis absorbansi spektrum, *Light Harvesting Efficiency* (LHE), tingkat energi dan akhirnya kami juga mempelajari perubahan energi bebas, dimana diperoleh kesimpulan kemampuan elektron injeksi (ΔG_{inject}) sebesar 0,5eV. Semua parameter yang telah menunjukkan kemampuan untuk sensitizer dan dapat digunakan untuk referensi dalam kecenderungan ekperimental berikutnya dalam hubungan dengan efisiensi keseluruhan

Pada tahun 2006 Kumara melakukan penelitian dengan menggunakan *shisonin*, klorofil dan gabungan dari keduanya. Pigmen yang di ekstrak dari daun *shiso* digunakan untuk pewarna pada keadaan padat, DSSC menggunakan p-CuI sebagai lubang konduktor. Efisiensi tertinggi diperoleh dari pewarna *cocktail* (*shisonin* and klorofil) yaitu 1.31%. Untuk pewarna *shisonin* dan klorofil berdasarkan DSSC masing-masing efisiensinya adalah 1.01% dan 0.59%. Tegangan *open-circuit* (mV), kerapatan arus (mA/cm^2), *fill factor* and efisiensi (%) menggunakan *shisonin* adalah 550, 0.59, 0.51 dan 1.01 sedangkan untuk klorofil adalah 432, 3.52, 0.39 and 0.59. Dan untuk campuran pewarna *solar cell* menunjukkan efisiensi tertinggi yaitu 1.31%.

Untuk meningkatkan kestabilan struktur kimia maka penambahan unsur logam seperti Mg, Zn, Cu, dan Se pun dilakukan pada senyawa *curcumin*. Tujuannya sebagai upaya untuk merekayasa gugus utama dalam senyawa serta meningkatkan stabilitas pada pewarna makanan (Zebib, B, dkk, 2010). Dalam penelitiannya menggunakan pewarna alami

curcumin yang berasal dari kunyit dan semikonduktor yang digunakan adalah ZnO nanopartikel. Hasil yang didapatkan yaitu untuk tegangan *open-circuit* 360 mV, kerapatan arus 1,66 mA, *fill factor* 0,35 dan efisiensi 0,131% (Ganesh T, dkk 2010). Pada penelitian yang dilakukan oleh Yuda, A. V (2016) membandingkan dua macam pewarna alami yaitu *curcumin* murni dengan campuran logam Cu pada pewarna *curcumin*. Semikonduktor yang digunakan yaitu TiO₂. Hasil yang didapatkan dari pewarna *curcumin* murni yaitu untuk tegangan *open-circuit* 633 mV, kerapatan arus 0,577 mA/cm², *fill factor* 0,507 dan efisiensi 0,185%. Sedangkan untuk pewarna dari campuran logam Cu dengan pewarna *curcumin* yaitu untuk tegangan *open-circuit* 630 mV, kerapatan arus 0,658 mA/cm², *fill factor* 0,620 dan efisiensi 0,259 %.

Ruhane, dkk (2017) meneliti tentang DSSC menggunakan pewarna alami *curcumin* yang didapat dari kunyit. Larutan yang digunakan untuk melarutkan pewarna yaitu aseton, ethanol, dan methanol. Dari ketiga larutan tersebut yang memiliki absorbansi tertinggi adalah aseton dengan jumlah 2,46 km⁻¹, diikuti ethanol (2,42 km⁻¹) lalu methanol (2,37 km⁻¹). Tegangan *open-circuit* (mV), kerapatan arus (mA/cm²), *fill factor* dan efisiensi (%) menggunakan pelarut aseton adalah 525, 0,4, 0,51 dan 0,10 sedangkan yang menggunakan pelarut ethanol adalah 500, 0,81, 0,29, dan 0,12 lalu yang menggunakan pelarut methanol adalah 568, 0,65, 0,44 dan 0,16.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Purbandini, S. R dan Haris, A (2018) untuk menurunkan kadar limbah logam berat dan senyawa organik yang bisa merusak lingkungan seperti fenol, Pb(II), dan COD menggunakan metode fotokatalis. Fotokatalis yang digunakan yaitu hasil dari TiO₂ yang ditambahkan ZnO, Akibatnya dapat mengurangi laju rekombinasi pasangan elektron-hole, sehingga proses redoks akan semakin efektif. Hasil dari penelitian tersebut adalah berhasil membuat komposit TiO₂/ZnO yang digunakan sebagai katalis untuk penurunan kadar fenol, Pb(II), serta COD secara simultan pada metode fotokatalisis. Dan hasil penurunan yang pada kadar fenol, Pb, dan COD menggunakan komposit TiO₂/ZnO selama 4 jam yaitu sebesar 98,1%; 82,4%; dan 91,05%. Hasil ini menunjukkan bahwa metode fotokatalisis dengan menggunakan komposit TiO₂/ZnO lebih efektif dibandingkan menggunakan TiO₂.

Banyak sekali penelitian tentang TiO₂ sebagai semikonduktor dan cara membuatnya guna memperbesar nilai efisiensi DSSC. Dengan peran TiO₂ sebagai penerima elektron dari *dye* maka dalam penelitian kali ini akan dicampurkan semikonduktor TiO₂ dengan material ZnO. TiO₂ yang memiliki kekurangan dalam mobilitas elektron akan

ditambahkan dengan ZnO yang memiliki mobilitas elektron yang tinggi. Sehingga penelitian ini diharapkan mampu meningkatkan kinerja dari DSSC.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas dapat dirumuskan suatu permasalahan yaitu bagaimana kinerja dari DSSC jika menggunakan penggabungan semikonduktor TiO_2 dengan ZnO.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menjawab rumusan masalah diatas dan menghindari agar permasalahan tidak meluas, maka dalam penelitian ini perlu diberikan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Kinerja yang ingin diukur dari DSSC adalah arus *short circuit*, tegangan *open-circuit*, *fill factor*, dan efisiensi
2. Pelapisan semikonduktor pada kaca TCO menggunakan teknik *doctor blade* dan tebal pendeposisian dianggap sama, yaitu 20 μm
3. Hambatan listrik dan transmitansi cahaya pada substrat (FTO) dipilih < 30 ohm dan lebih dari 75 %
4. Properti *counter electrode* yang menggunakan karbon terdeposisikan pada FTO dianggap mempunyai hambatan listrik yang seragam < 12 ohm
5. Suhu lingkungan saat pengujian *solar simulator* diabaikan
6. Pewarna organik yang dipakai mempunyai pigmen *curcumin*

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja dari DSSC jika menggunakan digabungan semikonduktor TiO_2 dengan ZnO

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian yang dapat diperoleh adalah :

1. Untuk menjadi referensi dan bahan kajian ilmu pengetahuan yang berkelanjutan terutama bagi mahasiswa teknik mesin mengenai DSSC
2. Memberikan dasar-dasar tentang pembuatan sel surya DSSC
3. Menghemat penggunaan sumber energi minyak fosil dengan memanfaatkan energi alternatif baru



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian yang dilakukan sebelumnya mengenai *Dye sensitized solar cell* (DSSC) telah banyak dilakukan. Pada tahun 1991 Professor Michael Gratzel menemukan DSSC, sel surya ini terdiri dari sebuah lapisan partikel nano yang diendapkan dalam sebuah perendam (*dye*) yang berfungsi untuk menangkap foton cahaya. Selain itu, Taya, dkk (2013) menemukan pewarna yang di ekstrak dari bahan segar dan kering. Daun dari lima tanaman berbeda digunakan sebagai *sensitizer*. Performansi terbaik didapatkan dari ekstrak daun bayam. Untuk lapisan semikonduktor yang digunakan adalah TiO_2 dan ZnO nano partikel. Performansi DSSC terbaik adalah kombinasi dari semikonduktor TiO_2 dengan pewarna daun bayam yang efisiensinya mencapai 0,29 %.

Santoso (2013) melakukan penelitian tentang variasi konsentrasi larutan dan temperatur pada pembuatan kaca FTO terhadap kinerja DSSC. Untuk konsentrasi larutan yang dipilih yaitu 0,3 M, 0,5 M, 0,7 M, 0,9 M dan temperatur pemanasan kaca yaitu 400°C, 450°C, 500°C serta menggunakan semikonduktor TiO_2 . Efisiensi tertinggi dengan nilai 0,786 % diperoleh dari konsentrasi larutan 0,7 M dengan temperatur pemanasan 400°C serta nilai transmitansi pada variasi tersebut adalah 81,41% dengan hambatan listrik 14,76 Ω .

Penggabungan bubuk arang bambu pada TiO_2 untuk meningkatkan efisiensi DSSC (Chou, 2015). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penerapan elektroda partikel komposit serbuk TiO_2 /bubuk arang bambu pada DSSC. Arang bambu disiapkan dari bambu Moso berumur 3 sampai 4 tahun dengan pembakaran mekanis pada 500°C selama 1 jam, dan bubuk arang bambu (BCP) kemudian dicampur dengan partikel komposit TiO_2 (P-25) melalui metode pencampuran kering.

Elektroda dilapisi zat warna dari partikel komposit TiO_2 (P-25) / BCP diaplikasikan dalam DSSC, dan system pengukuran I-V digunakan untuk mengukur arus fasa pendek (I_{sc}), *photovoltage* sirkuit terbuka (V_{oc}), dan konversi daya efisiensi DSSC. Rasio massa TiO_2 terhadap BCP dan ukuran rata-rata BCP secara substansial mempengaruhi I_{sc} dan efisiensi DSSC. Menariknya, efisiensi DSSC dengan elektroda TiO_2 (P-25) / BCP (5,4%) secara substansial melebihi DSSC konvensional dengan elektroda TiO_2 (P-25) (3,6%), hal ini disebabkan karena elektroda TiO_2 (P-25) / BCP memiliki kemampuan penyerapan baik.

Pembuatan lapisan fotoanoda komposit $\text{SnO}_2\text{-ZnO}$ untuk meningkatkan efisiensi konversi energi pada DSSC (Sujinnapram, 2015). Penelitian ini fokus pada peningkatan efisiensi konversi daya DSSC dengan penambahan SnO_2 ke fotoanoda ZnO_2 , efisiensi konversi daya dicapai dengan mengurangi hambatan transfer untuk menginduksi arah jalur transfer elektron pada fotoanoda yang diamati dalam hal densitas arus yang stabil. DSSC dibuat dari aditif rasio berat SnO_2 3-9% pada nanopartikel ZnO dan dilarutkan menjadi larutan polietilen glikol. Komposit $\text{SnO}_2\text{-ZnO}$ disiapkan pada substrat kaca FTO dengan teknik *doctor blade* dan anil pada suhu 450°C selama 1 jam. Ditemukan bahwa rasio berat SnO_2 sebesar 7% menunjukkan efisiensi konversi daya maksimum 1,75 % dan *fill factor* 0,46. Selain itu, parameter elektrokimia dihitung dari data spektroskopi impedansi elektrokimia di bawah standar simulasi sinar matahari. Tahanan transfer pada antarmuka dan waktu hidup elektron menurun seiring dengan meningkatnya rasio berat SnO_2 , menunjukkan bahwa laju transfer elektron meningkat.

Modifikasi fotoelektroda dan *counter-electrode* dengan teknik *sparkling*/percikan untuk meningkatkan efisiensi ZnO DSSC (Hongstith, 2015). Dalam penelitian ini, fotoelektroda ZnO dan *counter electrode* platina pada DSSC dimodifikasi dengan teknik percikan dan diinvestigasi sifat fotokonversinya. Fotoelektrik ZnO disesuaikan dengan menggunakan teknik *double layer*. Di sini, struktur DSSC adalah FTO / lapisan ganda ZnO / N719 / elektrolit / Pt *Counter electrode*. Karakteristik efisiensi untuk DSSC diukur pada iluminasi simulasi sinar matahari dengan daya radiasi $100 \text{ mW} / \text{cm}^2$. Ditemukan bahwa hasil terbaik DSSC diamati dengan kekuatan efisiensi konversi 2,53% pada 250 siklus percikan untuk *nanopowder* ZnO berlapis yang signifikan lebih tinggi dari 1,83% dari sel referensi. Peningkatan efisiensi dapat dijelaskan dengan munculnya hubungan arus *short-circuit* karena meningkatnya hamburan cahaya dan adsorpsi zat warna untuk fotoelektroda berlapis ganda dan peningkatan luas permukaan aktif nanopartikel platina di *counter electrode*.

Arifin Z, dkk (2017) melakukan penelitian dengan menggunakan pewarna sintetis N719 dan dibandingkan dengan pewarna alami klorofil yang didapat dari ekstrak daun pepaya. Untuk pewarna klorofil divariasikan lagi menjadi 5 konsentrasi yaitu 60 mM, 70 mM, 80mM, 90mM, dan 100mM. Semikonduktor yang digunakan adalah TiO_2 dan menggunakan pelarut ethyl alkohol. Untuk efisiensi tertinggi adalah 1,293% yang mana didapatkan dari pewarna sintetis N719. Untuk tegangan *open circuit* (V_{oc}) tertinggi adalah 0,606 V yang mana didapatkan dari pewarna alami klorofil dengan konsentrasi 100mM. Untuk arus *short circuit* (I_{sc}) tertinggi adalah $5,612 \text{ mA/cm}^2$ yang mana didapatkan dari

pewarna sintetis N719. Untuk *fill factor* (FF) tertinggi adalah 48,16 yang mana didapatkan dari pewarna alami klorofil dengan konsentrasi 70mM.

Pengurangan hidrogen pada karbon yang digunakan pada *counter electrode* untuk meningkatkan daya tahan DSSC (Takada, 2014). Dari penelitian ini menunjukkan adsorpsi senyawa yang berasal dari zat warna dan adsorben pada elektroda karbon H₂-reduksi sebagian berkurang, karena pembersihan pada permukaan yang dapat menyerap molekul besar. Hasilnya menunjukkan bahwa H₂ yang digunakan pada penelitian ini secara efektif mengurangi adsorpsi permukaan pada elektroda karbon, dan sebagai hasilnya meningkatkan daya tahan DSSC

2.2 Energi Surya

Energi surya merupakan energi yang berasal dari matahari. Hampir semua belahan di bumi ini disinari oleh matahari. Energi matahari dapat dimanfaatkan dengan berbagai cara, salah satunya adalah sel surya. Sel surya adalah suatu alat konversi energi yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Sel surya dapat menjanjikan masa depan yang cerah sebagai sumber energi listrik. Karena sel surya sanggup menyediakan energi listrik bersih tanpa polusi, efisien, tidak ada pemeliharaan yang spesifik dan bisa mencapai umur yang panjang. Indonesia mempunyai karakteristik cahaya matahari yang baik (intensitas cahaya tidak fluktuatif) dibanding dengan negara-negara yang memiliki 4 musim (Manan, 2009). Indonesia yang terletak pada daerah khatulistiwa akan selalu disinari matahari selama 10 - 12 jam dalam sehari.

Matahari memiliki radiasi yaitu kekuatan yang diendapkan matahari per satuan luas yang langsung terkena sinar matahari dan tegak lurus terhadapnya sebesar 1000 W/m². Cahaya matahari berasal dari cahaya putih yang dapat diuraikan menjadi komponen-komponen warna karena panjang gelombang cahaya yang berbeda untuk setiap warna yang berbeda. Komponen-komponen warna tersebut adalah merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila dan ungu atau yang biasa disebut dengan cahaya tampak karena terdeteksi oleh mata manusia. Cahaya tampak terletak pada panjang gelombang yang berkisar antara 380nm hingga 750nm (Handoko dan Fajariyanti, 2013).

Tabel 2.1
Panjang Gelombang Cahaya Tampak

| Warna | Panjang Gelombang (nm) |
|--------|------------------------|
| Merah | 650-760 |
| Jingga | 600-650 |
| Kuning | 560-600 |
| Hijau | 500-560 |
| Biru | 470-500 |
| Nila | 430-470 |
| Ungu | 390-430 |

Sumber : D. Dwidjoseputro (1989,p.13)

Tabel 2.1 menunjukkan warna cahaya tampak dengan karakteristik panjang gelombang masing-masing. Menurut D. Dwidjoseputro (1989) Sinar matahari terdiri atas berbagai sinar yang berlainan gelombangnya. Sinar-sinar yang memiliki gelombang lebih pendek daripada cahaya warna ungu adalah sinar ultra ungu (UV), sinar X, sinar gamma dan sinar kosmik. Sedangkan sinar yang memiliki panjang gelombang lebih besar daripada cahaya warna merah adalah cahaya infra merah. Adapun rumus untuk mencari energi radiasi didapat dari persamaan 2-1 (Anshori, 2005) :

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \dots\dots\dots (2-1)$$

Keterangan :

E = Energi Radiasi (J)

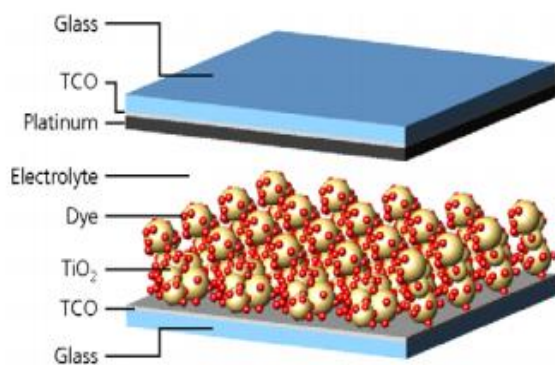
h = Tetapan Planck ($6,6 \times 10^{-34}$ Js)

c = Kecepatan Cahaya (3×10^8 m/s)

λ = Panjang Gelombang (m)

2.3 Dye-sensitized solar cell (DSSC)

DSSC adalah sel surya fotoelektrokimia yang menggunakan elektrolit sebagai medium *transport* muatan. Pada gambar 2.1 menunjukkan bahwa DSSC terbagi menjadi beberapa bagian yang terdiri dari kaca konduktif TCO, semikonduktor, molekul *dye* yang teradsorpsi di permukaan semikonduktor, elektrolit, dan katalis yang semuanya dideposisi di antara kaca konduktif TCO.



Gambar 2.1 Struktur DSSC
Sumber : Sastrawan, R (2006,p.10)

Pada bagian atas dan alas sel surya merupakan *glass*/kaca yang sudah dilapisi TCO (*Transparent Conducting Oxide*), yang berfungsi sebagai elektroda dan *counter electrode*. Pada TCO *counter electrode* dilapisi katalis untuk mempercepat reaksi redoks dengan elektrolit. Pasangan redoks yang dipakai yaitu I^-/I_3^- (*iodide/tri iodide*). Pada permukaan elektroda dilapisi semikonduktor biasanya TiO_2 yang mana *dye* teradsorpsi di pori TiO_2 .

2.3.1 Prinsip Kerja DSSC

Prinsip kerja dari *Dye-sensitized solar cell* seperti ditunjukkan pada gambar 2.2. Pada dasarnya prinsip kerja dari DSSC merupakan reaksi dari transfer elektron. Proses pertama dimulai dengan terjadinya eksitasi elektron pada molekul *dye* akibat *absorbs* foton ($h\nu$). Elektron tereksitasi dari *ground state* (D) ke *excited state* (D^*).



Elektron dari *excited state* (D^*) kemudian langsung terinjeksi menuju *electron conduction band* (ECB) titania sehingga molekul *dye* teroksidasi (D^+).



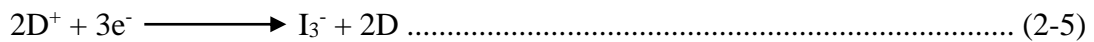
(Pada anoda terjadi pelepasan elektron dari *dye* atau reaksi oksidasi)

Setelah mencapai elektroda TCO, elektron mengalir menuju *counter* elektroda melalui rangkaian eksternal. Dengan adanya katalis pada *counter* elektroda, elektron diterima oleh elektrolit sehingga *hole* yang terbentuk pada elektrolit (I_3^-), akibat donor elektron pada proses sebelumnya, berkombinasi dengan elektron membentuk *iodide* (I^-).

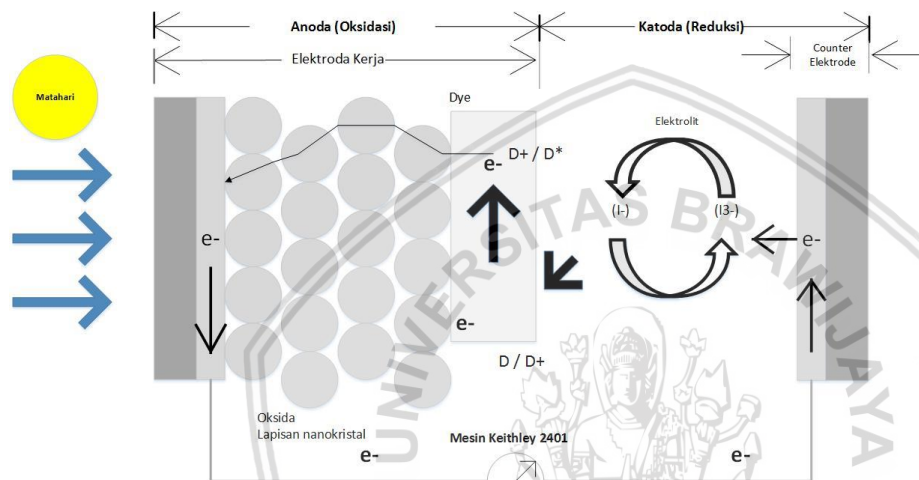


(Pada katoda terjadi penambahan elektron pada elektron atau reaksi reduksi)

Dengan adanya donor elektron oleh elektrolit (I^-) maka molekul *dye* kembali ke keadaan awalnya (*ground state*) dan mencegah penangkapan kembali elektron oleh *dye* yang teroksidasi.



Iodide ini digunakan untuk mendonorkan elektron kepada *dye* yang teroksidasi, sehingga terbentuk suatu siklus *transport electron*. Dengan siklus ini terjadi konversi langsung dari cahaya matahari menjadi listrik.

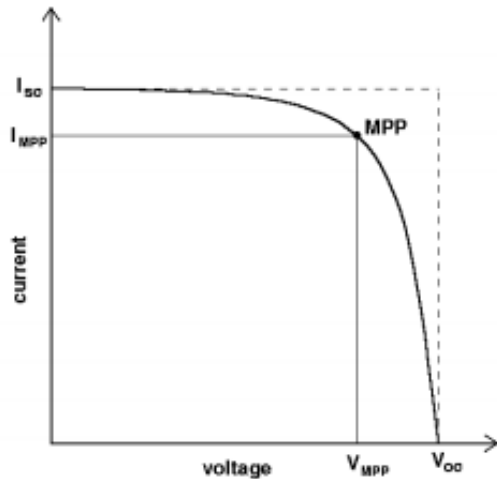


Gambar 2.2 Skema prinsip kerja dari DSSC
Sumber : Kalyanasundaram dan Gratzel (1998,p.359)

2.3.2 Karakteristik DSSC

Daya listrik yang dihasilkan sel surya ketika mendapat cahaya diperoleh dari kemampuan perangkat sel surya tersebut untuk memproduksi tegangan ketika diberi beban dan arus melalui beban pada waktu yang sama. Kemampuan ini dipresentasikan dalam kurva arus-tegangan (I-V)

Kapasitas daya dari sel atau modul surya diukur berdasarkan standar pengujian internasional yaitu *Standart Test Condition* (STC). Standar ini mengacu pada intensitas radiasi matahari sebesar 1000 W/m^2 yang tegak lurus sel surya pada suhu 25°C . Modul fotovoltaik memiliki hubungan antara arus dan tegangan yang diwakili dalam kurva I-V.



Gambar 2.3 Kurva arus-tegangan
Sumber : Halme (2002,p.25)

Gambar 2.3 menjelaskan bahwa pada saat tahanan variabel bernilai tak terhingga (*open circuit*) maka arus bernilai minimum (nol) dan tegangan pada sel berada pada nilai maksimum, yang dikenal sebagai tegangan *open circuit* (V_{oc}). Pada keadaan yang lain, ketika tahanan variabel bernilai nol (*short circuit*) maka arus bernilai maksimum, yang dikenal sebagai arus *short circuit* (I_{sc}). Jika tahanan variabel memiliki nilai bervariasi antara nol dan tak terhingga maka arus (I) dan tegangan (V) akan diperoleh nilai yang bervariasi juga.

Ketika sel dalam kondisi *short circuit*, arus maksimum atau arus *short circuit* (I_{sc}) akan dihasilkan, sedangkan pada kondisi *open circuit* tidak ada arus yang dapat mengalir sehingga tegangannya maksimum, disebut tegangan *open-circuit* (V_{oc}). Sedangkan titik pada kurva arus dan tegangan (kurva I - V) yang menghasilkan perkalian maksimum disebut titik daya maksimum atau *maximum power point* (MPP). Karakteristik penting lainnya dari sel surya yaitu *fill factor* (FF) yang merupakan perbandingan antara daya maksimum (MPP) terhadap perkalian V_{oc} dan I_{sc} , dengan persamaan 2-6 (Halme, 2002) :

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \dots\dots\dots (2-6)$$

Keterangan :

FF = *Fill Factor*

V_{MPP} = Tegangan Maksimum (mV)

I_{MPP} = Arus Maksimum (mA/cm²)

V_{oc} = Tegangan Open Circuit (mV)

I_{sc} = Arus Short Circuit (mA/cm²)

Dengan menggunakan *fill factor* maka maksimum daya dari sel surya didapat dari persamaan 2-7 :

$$P_{max} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \text{ (W/m}^2\text{)} \dots\dots\dots (2-7)$$

Keterangan :

P_{max} = Daya yang dihasilkan (mW/cm²)

V_{oc} = Tegangan Open Circuit (mV)

I_{sc} = Arus Short Circuit (mA/cm²)

FF = *Fill Factor*

Sehingga efisiensi sel surya yang didefinisikan sebagai daya yang dihasilkan dari sel (P_{max}) dibagi dengan daya dari cahaya yang datang (P_{cahaya}) seperti pada persamaan 2-8 :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{cahaya}} \text{ (%) } \dots\dots\dots (2-8)$$

Keterangan :

P_{max} = Daya yang dihasilkan (mW/cm²)

P_{cahaya} = Daya yang dihasilkan oleh matahari (mW/cm²)

Nilai efisiensi ini yang menjadi ukuran global dalam menentukan kualitas performansi suatu sel surya.

2.3.3 Material DSSC

a. Substrat

Substrat yang digunakan pada DSSC yaitu jenis TCO (*Transparent Conductive Oxide*) yang merupakan kaca transparan konduktif. Material substrat itu sendiri berfungsi sebagai badan dari sel surya dan lapisan konduktifnya yang berfungsi sebagai tempat muatan mengalir.

Material yang umumnya digunakan yaitu *fluorine-doped tin oxide* (SnO₃:F atau FTO) dan *indiumtin oxide* (In₂O₃:Sn atau ITO) hal ini dikarenakan dalam proses pelapisan material TiO₂ kepada substrat, diperlukan proses sintering pada temperature 400-500⁰C dan kedua material tersebut merupakan pilihan yang cocok karena tidak mengalami *defect* pada *range* temperatur (Gordon, 2000).

Menurut Kumar dan Zhou (2010) dibandingkan dengan ITO, FTO umumnya lebih resistan secara kimiawi, murah dan ketersediaan bahan baku yang lebih mudah diperoleh. Khusus untuk aplikasi DSSC menurut Sima, dkk (2010) FTO menunjukkan sifat konduktifitas listrik yang relatif lebih tahan terhadap perlakuan pemanasan dibandingkan

dengan ITO. Sehingga hal ini membuat FTO sangat potensial digunakan sebagai elektroda pada DSSC.

b. Semikonduktor

Penggunaan oksida semikonduktor dalam fotoelektrokimia dikarenakan kestabilan menghadapi fotokorosi (Kalyanasundaram dan Gratzel, 1998). Selain itu lebar pita energinya yang besar ($> 3\text{eV}$), dibutuhkan dalam DSSC untuk penyerapan energi foton dari sinar matahari guna mengeksitasi elektron dari zat pewarna. Selain semikonduktor TiO_2 yang digunakan dalam penelitian ini, semikonduktor lain yang dapat digunakan yaitu ZnO , CdSe , CdS , WO_3 , FeO_3 , SnO_2 , Nb_2O_5 dan Ta_2O_5 . Namun TiO_2 masih menjadi material yang sering digunakan karena efisiensi DSSC menggunakan TiO_2 masih belum tertandingi.

Umumnya, TiO_2 mempunyai tiga fasa yaitu rutil, anatase, dan brookite. Fasa rutil dari TiO_2 adalah fasa yang umum dan merupakan fasa yang disintesis dari mineral *ilmenite* melalui proses Becher. Becher, oksida besi yang terkandung dalam *ilmenite* dipisahkan dengan temperatur tinggi dan juga dengan bantuan gas sulfat atau klor sehingga menghasilkan TiO_2 rutil dengan kemurnian 91-93%.

Untuk aplikasinya pada DSSC, TiO_2 yang digunakan umumnya berfasa anatase karena mempunyai kemampuan fotoaktif yang tinggi. Selain itu TiO_2 dengan struktur nanopartikel yaitu ukuran partikel dalam skala nano akan menaikkan kinerja sistem karena struktur nano partikel mempunyai karakteristik luas permukaan yang tinggi sehingga akan menaikkan jumlah *dye* yang teradsorpsi yang implikasinya akan menaikkan jumlah cahaya yang terabsorpsi (Zhang dan Banfield, 2000). Akan tetapi, TiO_2 memiliki kekurangan yaitu memiliki mobilitas elektron yang rendah jadi kemampuan untuk mengalirkan elektron masih lemah.

Untuk menanggulangi kekurangan dari TiO_2 maka perlu dicampurkan dengan material lain. Zink oksida (ZnO) adalah salah satu material yang memiliki mobilitas elektron yang tinggi (Zhang, dkk, 2009). ZnO banyak digunakan dalam bidang optoelektronika, sensor, biomedis, elektrokimia dan lain sebagainya. Dengan mobilitas elektron yang lebih baik dari TiO_2 memungkinkan ZnO sebagai kandidat lapisan penerima dan pengangkut elektron yang baik pada DSSC. Pada penelitian ini, pencampuran ZnO ke TiO_2 menggunakan perbandingan massa 2:1. Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Purbandini dan Haris (2018) 2:1 adalah perbandingan massa untuk mendapatkan hasil yang maksimal serta ZnO yang digunakan adalah ZnO teknis.

c. Dye

Dye atau zat warna merupakan komponen penting DSSC yang bertindak sebagai penyerap foton cahaya tampak atau *sensitizer* sehingga semikonduktor TiO₂ yang hanya bekerja pada daerah UV dapat bekerja pada daerah cahaya tampak. *Sensitizer* anorganik berupa zat warna kompleks logam transisi sintetis mempunyai stabilitas yang baik, contohnya kompleks *ruthenium polipiridil*, *osmium*, logam porfirin (Kong dkk, 2007). Meski sudah terbukti efektif, tetapi tingginya biaya produksi, keterbatasan bahan, dan efek samping yang ditimbulkan pada lingkungan menjadi hambatan ketika akan diimplementasikan dalam skala besar.

Para peneliti kemudian mulai melakukan penelitian dengan menggunakan senyawa organik sebagai zat warna *sensitizer* yang lebih murah, mudah diperoleh dan diproduksi, serta ramah lingkungan. Senyawa organik dari alam juga dapat digunakan sebagai *sensitizer* pada DSSC. Pigmen alami seperti klorofil, karoten, *curcumin*, dan antosianin yang diekstrak dari daun, buah, bunga, maupun akar dapat digunakan sebagai *sensitizer* pada DSSC (Zhou dkk, 2011).

Curcumin merupakan pewarna organik yang berasal dari tanaman kunyit. Bagian tumbuhan kunyit yang memiliki pigmen *curcumin* adalah akarnya. Kunyit merupakan tumbuhan daerah subtropis sampai tropis dan tumbuh subur di daratan rendah lebih kurang 90 meter sampai ketinggian 2000 meter di atas permukaan laut. Pewarna *curcumin* mempunyai absorbansi panjang gelombang cahaya nampak pada 420-580 nm. *Curcumin* adalah pewarna yang dapat digunakan pada *solar cell* karena ramah lingkungan, efektif, memiliki stabilitas tinggi terhadap panas dan kimia (Kim, H. J., dkk., 2013). Berdasarkan klasifikasi botani, tanaman kunyit termasuk ke dalam klasifikasi sebagai berikut (Dalimartha, S, 2008) :

| | |
|------------|------------------------------|
| Kingdom | : <i>Plantae</i> |
| Divisi | : <i>Spermatophyte</i> |
| Sub divisi | : <i>Angiospermae</i> |
| Kelas | : <i>Monocotyledonae</i> |
| Ordo | : <i>Zingiberales</i> |
| Famili | : <i>Zingiberaceae</i> |
| Genus | : <i>Curcuma</i> |
| Spesies | : <i>Curcuma domestica V</i> |

d. Elektrolit

Elektrolit yang digunakan pada DSSC terdiri dari *iodine* (I-) dan *triiodide* (I₃-) sebagai pasangan redoks dalam pelarut. Elektrolit berfungsi sebagai mediator elektron untuk mentransport elektron dari *dye* sehingga terjadi siklus elektron pada DSSC. *Triiodida* dari elektrolit yang terbentuk akan menangkap elektron yang berasal dari rangkaian luar dengan bantuan molekul karbon sebagai katalis. Elektron yang tereksitasi masuk kembali ke dalam sel dan bereaksi dengan elektrolit menuju *dye* teroksidasi. Elektrolit menyediakan elektron pengganti untuk molekul *dye* teroksidasi, sehingga *dye* kembali ke keadaan awal sebelum tereksitasi. Karakteristik ideal dari pasangan redoks untuk elektrolit DSSC yaitu (Wolfbauer dkk, 2001) :

1. Potensial redoksnya secara termodinamika berlangsung sesuai dengan potensial redoks dari *dye* untuk tegangan sel yang maksimal
2. Tingginya kelarutan terhadap pelarut untuk mendukung konsentrasi yang tinggi dari muatan pada elektrolit
3. Pelarut mempunyai koefisien difusi yang tinggi untuk transportasi massa yang efisien
4. Tidak adanya karakteristik spektral pada daerah cahaya tampak untuk menghindari absorpsi cahaya datang pada elektrolit
5. Kestabilan yang tinggi baik dalam bentuk tereduksi maupun teroksidasi
6. Mempunyai reversibilitas tinggi
7. Inert terhadap komponen lain pada DSSC

e. Katalis Counter Elektroda

Katalis dibutuhkan untuk mempercepat reaksi proses reduksi *triiodide* pada kaca TCO. Material yang digunakan pada elektroda lawan adalah zat yang tidak mudah bereaksi (inert), seperti platina, emas dan karbon. Platina, material yang umum digunakan sebagai katalis pada berbagai aplikasi dan juga sangat efisien dalam aplikasinya pada DSSC. Platina dideposisikan pada TCO dengan berbagai metode yaitu elektrokimia, *sputtering*, *spin coating*, atau *pyrolysis*.

Walaupun mempunyai kemampuan katalitik yang tinggi, platina merupakan material yang mahal. Sebagai alternatif, Kay dan Gratzel (1996) mengembangkan desain DSSC dengan menggunakan *counter* elektroda karbon sebagai lapisan katalis. Material karbon menjadi alternatif karena ketersediaannya yang melimpah di alam serta memiliki struktur yang bervariasi, diantaranya karbon *nanotube*, karbon *nanowire*, dll. Batang grafit atau grafit lunak pada pensil juga dapat dipakai sebagai *counter electrode*. Bahan yang mengandung

karbon memiliki sifat yang menguntungkan seperti konduktivitas elektronik cukup tinggi, tahan korosi terhadap *triiodida*, reaktivitas tinggi untuk reduksi *triiodida* dan biaya rendah, sehingga merupakan alternatif pengganti platinum.

2.4 Hipotesis

Mencampurkan ZnO ke TiO_2 akan membuat reaksi redoks menjadi lebih efektif dan mobilitas elektron juga semakin baik sehingga dapat menyebabkan arus *short circuit* (I_{sc}) meningkat. Meningkatnya I_{sc} juga akan berpengaruh terhadap efisiensi DSSC yang dihasilkan. Semakin besar nilai arus *short circuit* yang dihasilkan maka efisiensi DSSC juga akan meningkat pula.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental nyata (*true eksperimental reseach*), yaitu melakukan pengamatan untuk mencari data sebab dan akibat dalam suatu proses melalui eksperimen sehingga dapat mengetahui pengaruh variasi pelarut terhadap performansi DSSC.

3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan di :

- Laboratorium Nano Bio Energi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta pada bulan Maret 2018 – Mei 2018.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah :

1. Variabel bebas

Variabel bebas pada penelitian ini adalah perbandingan DSSC yang menggunakan semikonduktor TiO_2 dan TiO_2/ZnO dengan perbandingan massa 2:1.

2. Variabel terikat

Variabel terikat yang diamati pada penelitian ini adalah tegangan *open circuit* (V_{oc}), arus *short circuit* (I_{sc}), efisiensi DSSC, bentuk partikel, dan ukuran kristal.

3. Variabel terkontrol

Dalam penelitian ini variabel terkontrolnya adalah daya penyinaran dan suhu ruangan saat pengujian

3.4 Alat dan bahan yang Digunakan

Berikut adalah alat dan bahan yang digunakan untuk membuat DSSC :

1. Pembuatan kaca FTO

Bahan yang pertama disiapkan untuk membuat kaca FTO adalah *Tin (II) Chloride* ($\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) dan *Amonium Fluoride* (NH_4F) yang telah ditimbang massanya menggunakan timbangan digital.

Siapkan juga larutan *ethanol* yang telah diukur dalam gelas ukur. Lalu dilarutkan dalam *ethanol* menggunakan *magnetic stirrer*. Siapkan kaca dengan ukuran 20 mm X 20 mm X 3 mm dan letakkan diatas plat baja dan panaskan dengan menggunakan kompor listrik hingga mencapai suhu 500°C. Untuk mengontrol suhu agar stabil, maka menggunakan *thermocouple* dan *temperature controller*. Setelah itu, siapkan *nebulizer* untuk mengkabutkan campuran larutan *Tin (II) Chloride* dan *Amonium Fluoride* serta cerobong untuk menyalurkan hasil pengkabutan pada kaca.

2. Pembuatan Pasta Semikonduktor

Untuk membuat pasta semikonduktor pertama, bahan yang disiapkan adalah TiO_2 (*nanopowder*, 21nm Sigma-Aldrich) yang telah ditimbang massa menggunakan timbangan digital. Siapkan juga larutan *ethanol* yang telah diukur dalam gelas ukur. Setelah itu, letakkan pada kaca vial dan tambahkan dengan *ethanol*. Lalu aduk menggunakan *magnetic stirrer*.

Untuk membuat pasta semikonduktor kedua, bahan yang disiapkan adalah TiO_2 (*nanopowder*, 21nm Sigma-Aldrich) dan ZnO teknis yang telah ditimbang massa menggunakan timbangan digital. Siapkan juga larutan akuades yang telah diukur dalam gelas ukur. Campurkan kedua bahan tersebut dalam gelas vial dan tambahkan akuades. Lalu aduk disertai dengan pemanasan konstan pada suhu 90°C menggunakan *magnetic stirrer hot plate* digital. Untuk mendapatkan bentuk padatan, maka digunakan *furnace*. Padatan yang terbentuk ditimbang lagi dengan menggunakan timbangan digital. Setelah itu, letakkan pada kaca vial dan tambahkan dengan *ethanol* yang telah diukur dalam gelas ukur. Lalu aduk menggunakan *magnetic stirrer*.

3. Pembuatan Pewarna

Bahan yang pertama kunyit yang sudah dibersihkan dan dipotong tipis menggunakan pisau. Blender kunyit yang telah dikeringkan agar menjadi serbuk. Siapkan juga larutan *ethanol* yang telah diukur dalam gelas ukur. Lalu serbuk kunyit ditimbang dengan timbangan digital dan dilarutkan menggunakan *ethanol* pada gelas kimia. Setelah itu, diaduk disertai dengan pemanasan konstan pada suhu 70°C menggunakan *magnetic stirrer hot plate* digital. Kemudian, menggunakan kertas saring dan kertas *whatman* untuk mengekstrak kunyit. Setelah itu, menggunakan *rotary evaporator* untuk menghilangkan *ethanol* dan mendapatkan ekstrak kunyit murni. Hasil ekstrak kunyit ditimbang menggunakan timbangan digital pada gelas ukur, lalu dicampur dengan *ethanol* menggunakan *magnetic stirrer*.

4. Pembuatan Elektrolit

Bahan yang disiapkan yaitu *Sodium Iodide* (NaI), *Iodine* (I₂), dan HPA yang telah ditimbang menggunakan timbangan digital. Siapkan juga larutan asetonitril yang telah diukur dalam gelas ukur. Larutkan ketiga bahan tersebut kedalam asetonitril dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer*.

5. Pembuatan *Counter Elektrode*

Bahan yang disiapkan adalah kaca FTO dan pensil. Pensil digunakan untuk mengarsir kaca FTO.

6. Perakitan DSSC

Bahan yang harus dipersiapkan terlebih dahulu untuk merakit DSSC adalah kaca FTO, pasta semikonduktor, pewarna, elektrolit, dan *counter electrode*. Siapkan isolasi bening untuk menahan kaca FTO dan memberikan ukuran saat pendeposisian semikonduktor. Gunakan pipet untuk mendeposisikan pasta semikonduktor lalu masukkan kedalam *furnace* untuk di sintering. Siapkan gelas kimia yang telah diisi dengan pewarna untuk merendam kaca FTO setelah keluar dari *furnace*. Siapkan klip untuk merekatkan kaca FTO setelah direndam dengan *counter elektrode*. Lalu ambil elektrolit menggunakan pipet untuk ditetesi ke dalam DSSC

7. Pengujian Solar Simulator

Alat yang disiapkan yaitu lampu halogen untuk penyinaran, mesin Keithley 2401 untuk membaca arus dan tegangan yang dihasilkan, pyranometer untuk mengukur intensitas cahaya, laptop untuk memunculkan nilai dan grafik I-V, kabel merah untuk anoda dan kabel hitam untuk katoda. DSSC yang telah ditetesi dengan elektrolit disambungkan dengan mesin Keithley 2401 menggunakan kabel. Laptop disambungkan dengan mesin Keithley 2401 menggunakan kabel USB.

Jadi alat-alat yang digunakan untuk membuat bagian-bagian, merakit, hingga menguji DSSC antara lain :



Gambar 3.1 *Magnetic Stierrer*

Spesifikasi :

- Merk : SCIOLOGEX
- Tipe : MS-H280-Pro
- Rentang Temperatur : 25 - 280°C
- Rentang Kecepatan : 200-1500rpm
- Tipe Motor : DC Brushless Motor
- *Heat Output* : 500W
- Voltase : 110Volts 60Hz, 515W



Gambar 3.2 Timbangan Digital

Spesifikasi :

- Merk : DURASCALE
- Tipe : DPB1000
- Kapasitas : 1000g
- Rasio Resolusi: 0.01g
- Nilai Kalibrasi: 10d
- Berat Kalibrasi: 500g
- Dimensi : 196(W) x 215(D) x 62(H) mm
- Suhu Pakai : 0 - 40 derajat Celcius



Gambar 3.3 Nebulizer

Spesifikasi :

- Merk : OMRON
- Tipe : NE-C28
- Power Consumption : 138 VA, 230 V/50Hz
- Nebulizer Rate : 0,4 ml/min
- Ukuran Partikel : 3 μ m
- Medication Cup Capacity : 7 ml
- Appropriate Medication Quantities : 2-7 ml
- Suhu Pakai : 10 - 40 derajat Celcius



(a)

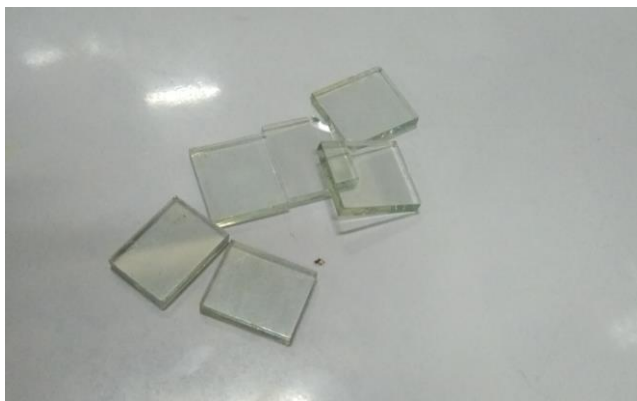


(b)



(c)

Gambar 3.4 Gelas Ukur 100ml (a), Gelas Kimia 1000ml (b), Kaca Vial (c)



Gambar 3.5 Kaca 20 mm X 20 mm X 3 mm



Gambar 3.6 *Thermocouple* (a) dan *Temperature Controller* (b)



Gambar 3.7 *Furnace*

Spesifikasi :

- Merk : BROTHER
- Tipe : XD-1700M
- *Heating Rate* : 0-15°C/min
- Daya Maksimal : 5 KW
- Ukuran Ruang Bakar : 150x150x200 mm
- Suhu Kerja : 1600 - 1700 derajat Celcius



Gambar 3.8 Rotary Evaporator



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.9 Lampu Halogen (a), Mesin Keithley 2401 (b), Pyranometer (c)

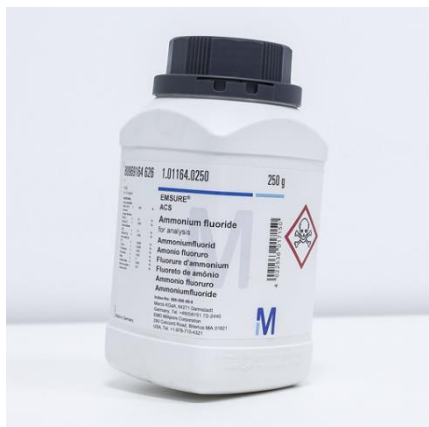
Untuk bahan-bahan yang digunakan untuk membuat bagian-bagian, merakit, hingga menguji DSSC antara lain :



Gambar 3.10 Tin (II) Chloride ($\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Spesifikasi :

- Iodometric ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) : 98.0 - 103.0 %
- Sulfate (SO_4) : ≤ 0.002 %
- Heavy metals (as Pb) : ≤ 0.005 %
- As (Arsenic) : ≤ 0.0001 %
- Ca (Calcium) : ≤ 0.005 %
- Cu (Copper) : ≤ 0.001 %
- Fe (Iron) : ≤ 0.002 %
- Hg (Mercury) : ≤ 0.000001 %
- K (Potassium) : ≤ 0.005 %
- Na (Sodium) : ≤ 0.01 %
- NH_4 (Ammonium) : ≤ 0.002 %
- Pb (Lead) : ≤ 0.005 %



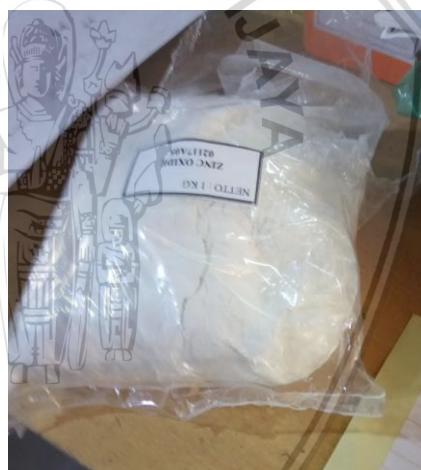
Gambar 3.11 Amonium Fluoride (NH_4F)

Spesifikasi :

- Titration (NH_4F) : $\geq 98.0 \%$
- Ammonium hydrogen difluoride (NH_4HF_2) : $\leq 0.5 \%$
- Chloride (Cl) : $\leq 0.001 \%$
- Hexafluorosilicate (SiF_6) : $\leq 0.1 \%$
- Sulfate (SO_4) : $\leq 0.005 \%$
- Heavy metals (as Pb) : $\leq 0.0005 \%$
- Fe (Iron) : $\leq 0.0005 \%$
- K (Potassium) : $\leq 0.002 \%$
- Na (Sodium) : $\leq 0.002 \%$
- Water : $\leq 5 \%$
- Insoluble matter : $\leq 0.005 \%$
- Residue on ignition : $\leq 0.01 \%$



(a)



(b)

Gambar 3.12 TiO_2 (nanopowder, 21nm Sigma-Aldrich) (a) dan ZnO teknis (b)



(a)

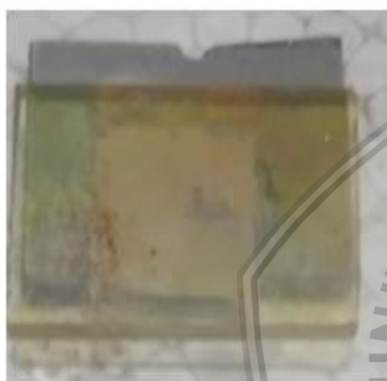


(b)



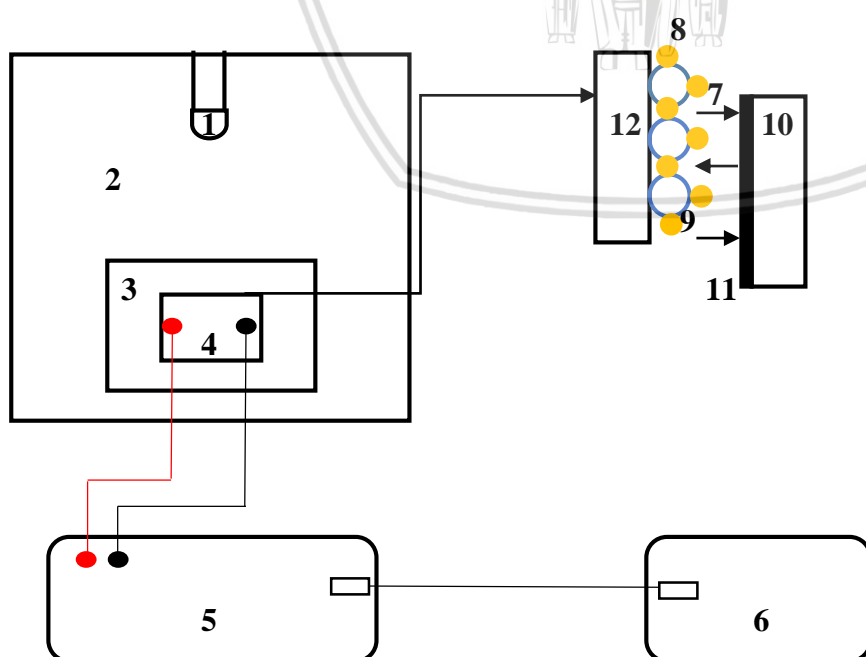
(c)

Gambar 3.13 asetonitril 99% (a), ethanol 96% (b), akuades 96% (c)

Gambar 3.14 Pewarna *Curcumin*

Gambar 3.15 DSSC

3.5 Instalasi Penelitian



Gambar 3.16 Instalasi Penelitian

Keterangan :

1. Lampu Halogen
2. *Casing*
3. Meja
4. DSSC
5. Mesin Keithley 2401
6. Laptop
7. Elektrolit
8. *Dye*
9. Semikonduktor
10. *Counter Electrode*
11. Karbon
12. Kaca FTO

Instalasi penelitian ditunjukkan pada gambar 3.1 dimana DSSC dihubungkan dengan mesin Keithley 2401. Kabel merah dihubungkan dengan anoda/elektroda dan kabel hitam dihubungkan dengan katoda/*counter electrode*. Setelah DSSC nilainya diukur oleh mesin Keithley 2401 maka hasilnya akan langsung ditampilkan pada layar laptop.

3.6 Prosedur Penelitian

Langkah - langkah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mempelajari hal – hal yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan sehingga dapat menguatkan dalam pengambilan hipotesis serta memperjelas hasil penelitian.

2. Observasi lapangan

Observasi lapangan dilakukan untuk studi terhadap peralatan yang diperlukan dalam penelitian.

3. Pembuatan alat

Pembuatan alat dilakukan dengan mempersiapkan bahan untuk pembuatan DSSC.

4. Pengujian dan pengambilan data

Pengujian dilakukan pada hasil perakitan DSSC dan pengambilan data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah arus *short circuit*, tegangan *open circuit*, *fill factor*, dan efisiensi.

5. Analisa

Analisa pengujian dilakukan dengan menghitung data – data menggunakan rumus kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik.

3.7 Prosedur Pembuatan Model

Berikut adalah prosedur pembuatan model:

1. Persiapan

Tahap persiapan adalah mempersiapkan bahan dan peralatan yang diperlukan pada saat pelaksanaan penelitian

A. Persiapan kaca FTO

FTO dalam penelitian ini akan digunakan sebagai lapisan atas untuk penerus cahaya dan sebagai dasar untuk *counter* elektroda. Proses pembuatannya sebagai berikut :

1. Timbang bahan yang dibutuhkan :

- 0,7 M *Tin (II) Chloride* ($\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 16,1161 gram

- 0,7 M *Amonium Fluoride* (NH_4F) 0,2646 gram
- 2. Siapkan kaca dengan ukuran 20 mm X 20 mm X 3 mm
- 3. Nyalakan kompor listrik
- 4. Melarutkan *Tin (II) Chloride* ($\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) dan *Amonium Fluoride* (NH_4F) kedalam 100 ml ethanol
- 5. Meletakkan plat baja diatas kompor
- 6. Meletakkan kaca di atas plat baja
- 7. Taruh cerobong di atas kaca dan hubungkan cerobong dengan selang
- 8. Isi nebulizer dengan larutan ethanol yang sudah dicampur *Tin (II) Chloride* ($\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) dan *Amonium Fluoride* (NH_4F)
- 9. Memanaskan plat diatas kompor sampai dengan suhu 500°C
- 10. Tepat saat plat pada suhu 500°C maka dimulai proses pengkabutan
- 11. Setelah selesai proses pengkabutan ± 10 menit maka dilakukan pendinginan lambat
- 12. Buka cerobong saat plat sudah berada pada suhu di bawah 100°C

B. Pembuatan *Counter Electrode*

Counter electrode digunakan pada lapisan bawah yang juga berfungsi sebagai katalis untuk mempercepat reaksi redoks elektrolit. Proses pembuatannya sebagai berikut :

1. Siapkan pensil
2. Arsir kaca konduktif hingga berwarna kehitaman. Proses pengarsiran ini menyebabkan substrat terlapisi oleh karbon (*Counter electrode Carbon*). Karbon ini berfungsi sebagai katalis.

C. Pembuatan Pasta Semikonduktor

Semikonduktor yang akan divariasikan pada penelitian ini ada 2 yaitu TiO_2 dan TiO_2/ZnO yang akan dideposisikan dengan teknik *doctor blade*. Sebelum dideposisikan pada kaca FTO semikonduktor akan dibuat dalam bentuk pasta terlebih dahulu, yaitu dengan prosedur pembuatan sebagai berikut :

1. Timbang 0,5 gram TiO_2 didalam kaca vial dengan neraca digital
2. Tambahkan 4 ml ethanol
3. Aduk dengan *magnetic stirrer* hingga 5 jam
4. Hasilnya diperoleh larutan semikonduktor seperti pasta

Untuk DSSC yang menggunakan TiO_2/ZnO pertama-tama dilakukan penggabungan dengan metode *mixing* (Steffita dan Abdul, 2018), berikut langkah-langkahnya :

1. TiO_2 ditambahkan dengan ZnO teknis dengan perbandingan 2:1
2. Larutkan ke dalam akuades kemudian dilakukan pengadukan selama 1 jam

3. Setelah itu, dilakukan pemanasan pada suhu 90°C yang disertai dengan pengadukan selama 3 jam.
4. Lalu masuk dalam tahap pengeringan pada suhu 150°C selama 2 jam
5. Pada tahap akhir dipanaskan pada suhu 500°C selama 1 jam dan akan terbentuk padatan TiO_2/ZnO yang berwarna putih

Setelah didapatkan padatan TiO_2/ZnO maka dilanjutkan dengan pembuatan pastanya, langkah-langnya seperti dibawah ini :

1. Timbang 0,5 gram TiO_2/ZnO didalam kaca vial dengan neraca digital
2. Tambahkan 4 ml ethanol
3. Aduk dengan *magnetic stirrer* hingga 5 jam
4. Hasilnya diperoleh larutan semikonduktor seperti pasta

D. Pembuatan larutan Dye

Pewarna yang digunakan untuk penelitian ini adalah pewarna alami dari ekstrak kunyit. Prosedur pembuatan pewarna alami sebagai berikut :

1. Siapkan kunyit
2. Potong tipis-tipis kunyit lalu dijemur hingga kering
3. Blender kunyit hingga berbentuk menjadi serbuk
4. Serbuk kunyit dimasukkan kedalam ethanol (perbandingan kunyit : etanol = 1 :7) dan diekstrak dalam *sochlet*
5. Proses ekstraksi dilakukan selama ± 7 jam dengan temperatur pemanasan 70°C
6. Dilanjutkan pemisahan antara ekstrak bahan pewarna dengan ethanol menggunakan *rotary evaporator*
7. Hasil ekstrak kunyit kemudian dicampur dengan ethanol dengan konsentrasi 8 g/100 ml

E. Pembuatan larutan elektrolit

Elektrolit yang dipakai dalam penelitian ini adalah *sodium iodide* (NaI) 99,95% murni, *iodide* 99,95 % murni, asetonitril dan HPA. Prosedur pembuatan larutan elektrolit sebagai berikut (Yuda, 2016) :

1. Timbang bahan elektrolit :
 - NaI = 3,3 g
 - I_2 = 0,523875 g
 - HPA = 0,005481 g
 - Asetonitril = 30 ml
2. NaI dilarutkan kedalam asetonitril dan dilakukan pengadukan selama 15 menit

3. Larutan tersebut ditambahkan I_2 dan diaduk selama 15 menit lalu dilanjutkan penambahan HPA
4. Pengadukan dilanjutkan selama 4 jam

2. Assembly DSSC

Setelah masing-masing komponen DSSC berhasil dibuat kemudian dilakukan *assembly* untuk membentuk sel surya dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- Pada FTO yang telah dipotong menjadi ukuran 2 x 2 cm dibentuk area tempat semikonduktor dideposisikan dengan bantuan isolasi pada bagian kaca konduktif sehingga terbentuk area sebesar 1 x 1 cm
- Pasta semikonduktor dideposisikan diatas area yang telah dibuat pada kaca konduktif dengan metode *doctor blade* yaitu dengan bantuan batang pengaduk untuk meratakan pasta, ketebalan lapisan semikonduktor pada kaca FTO sebesar 20 μm . Kemudian lapisan dikeringkan selama lebih kurang 15 menit dan dibakar/*sintering* dalam *furnace* pada temperatur 450 $^{\circ}\text{C}$ selama 2 jam dengan tujuan agar terjadi ikatan antara FTO dengan semikonduktor (Yuda, 2016).
- Kaca konduktif yang telah dideposisikan pasta semikonduktor dan telah di *sintering* kemudian direndam dalam larutan *dye* selama lebih kurang 24 jam. Pada proses ini terjadi adsorpsi pewarna ke permukaan semikonduktor.
- *Counter-elektroda* yang telah diberi katalis karbon kemudian diletakkan diatas lapisan semikonduktor/*dye* dengan struktur *sandwich* dimana masing-masing ujung diberi *offset* sebesar 0,5 cm untuk kontak elektrik. Kemudian agar struktur selnya mantap diberikan klip pada sambungan antar kaca
- Larutan elektrolit kemudian ditetaskan kira-kira sebanyak 2 tetes pada sisi-sisi dari sambungan DSSC. Dan DSSC siap untuk diuji

3. Pengujian

Pada penelitian ini pengujian yang akan dilakukan yaitu :

A. Pengujian XRD

Pengujian XRD (*X-Ray Diffractometer*) digunakan untuk menganalisa struktur kristal menggunakan *Philips Analytical X-Ray* pada rentang sudut 2θ 10 $^{\circ}$ - 90 $^{\circ}$. Prinsip kerja XRD yaitu setiap senyawa terdiri dari susunan atom-atom yang membentuk bidang tertentu. Jika sebuah bidang memiliki bentuk yang tertentu, maka partikel cahaya (foton) yang datang dengan sudut tertentu hanya akan menghasilkan pola pantulan maupun pembiasan yang khas (Setiabudi A, dkk., 2012). Pada XRD, pola difraksi dinyatakan dengan besar sudut-sudut yang terbentuk sebagai hasil dari difraksi berkas cahaya oleh kristal pada material. Nilai

sudut tersebut dinyatakan dalam 2θ , dimana θ merepresentasikan sudut datang cahaya. Sedangkan nilai 2θ merupakan besar sudut datang dengan sudut difraksi yang terdeteksi oleh detektor. Persamaan untuk menghitung ukuran kristal menggunakan metode Scherrer (3-1) :

$$D = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \dots\dots\dots (3-1)$$

Dimana :

D = Ukuran Kristal (nm)

k = Konstanta (0,9)

λ = Panjang Gelombang dari Radiasi sinar X (0,15406 nm)

β = Nilai FWHM (radian)

θ = Sudut Difraksi ($^{\circ}$)

FWHM (*Full Width at Half Maximum*) merupakan lebar dari puncak difraksi dalam satuan radian pada ketinggian setengah dari jarak antara landasan ke puncak maksimum. Hasil pengujian XRD ini berupa grafik yang akan digunakan untuk menentukan ukuran kristal melalui metode Scherrer. Lalu untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk digunakan *Joint Committee on Powder Diffraction Standard* (JCPDS). Untuk standart yang digunakan pada TiO_2 adalah JCPDS No: 21-1272. Untuk standart yang digunakan pada ZnO adalah JCPDS No : 36-1451. Pengujian XRD dilakukan di Lab. MIPA terpadu, FMIPA UNS.

B. Pengujian SEM

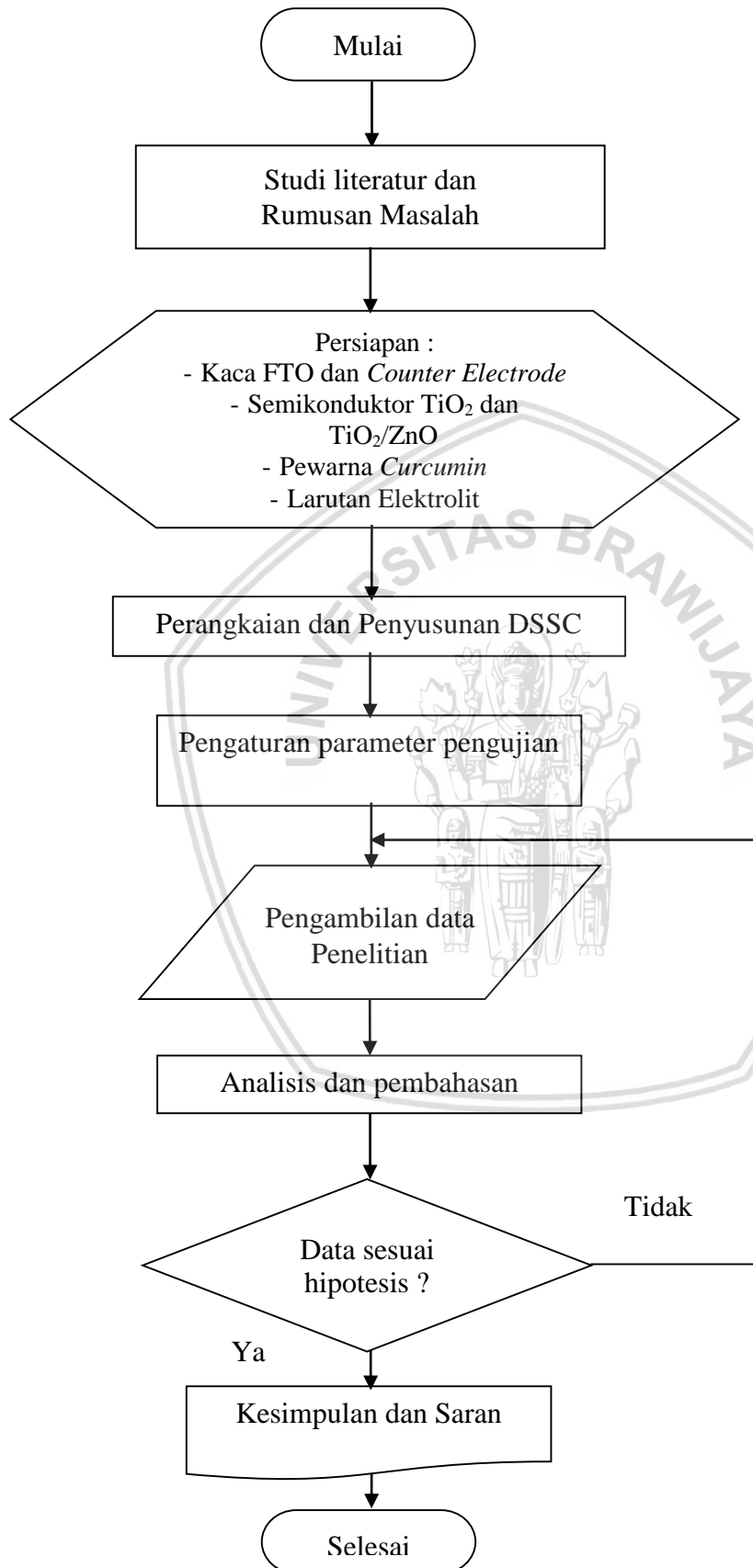
Pengujian semikonduktor menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*), uji ini digunakan untuk menganalisa struktur morfologi dari sampel semikonduktor. Pengujian SEM dilakukan di Lab. Sentral Mesin, FT UB

C. Pengujian Sel Surya

Uji ini dilakukan untuk mengetahui efisiensi dari sel surya yang telah dibuat. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *solar simulator* untuk menghasilkan cahaya dengan intensitas yang dapat diukur (umumnya 1000 W/m^2). Mesin *Keithley* 2401 akan mengukur tegangan dan arus yang dihasilkan oleh DSSC pada setiap variasi pembebanan yang dilakukan. Selain itu, nilai karakteristik dari performa DSSC seperti V_{oc} , I_{sc} , FF, dan efisiensi juga dapat langsung dihasilkan dari alat tersebut. Pengujian Sel Surya dilakukan di Lab. Nano Bio Energi, FT UNS

3.8 Diagram Alir Penelitian

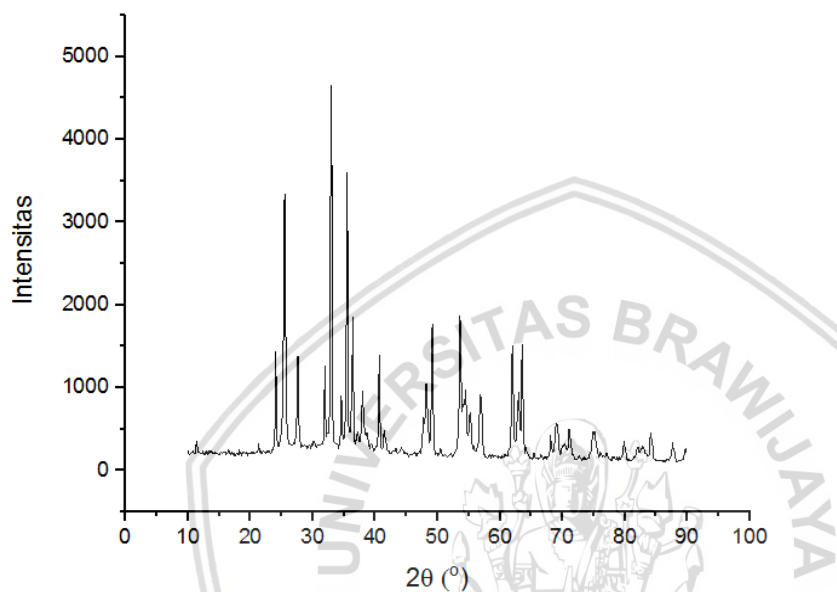
Berikut adalah diagram alir penelitian yang akan dilakukan:



Gambar 3.17 Diagram Alir Penelitian

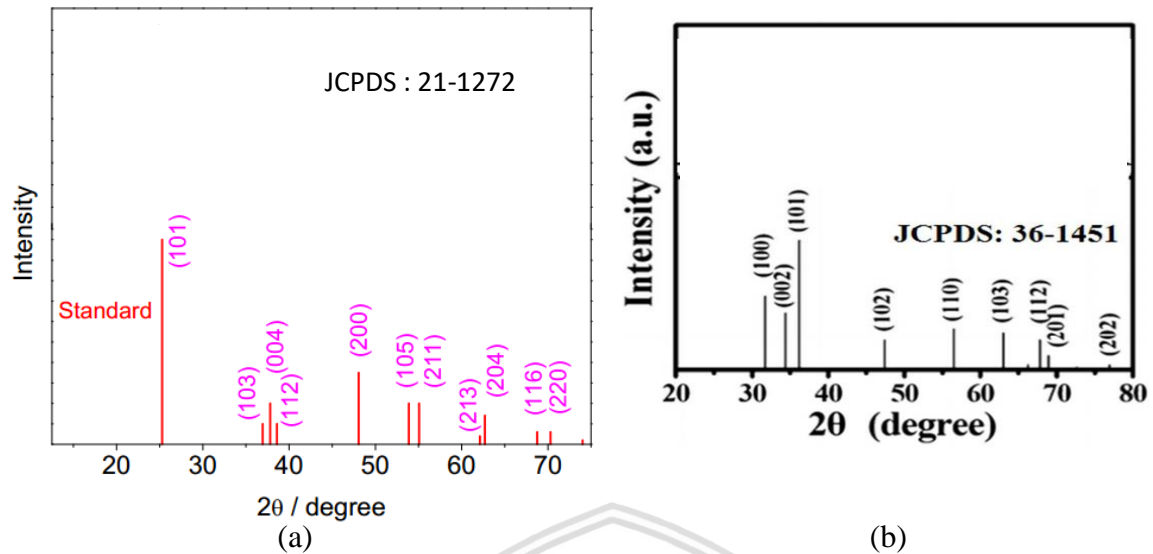
BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Hasil XRD



Gambar 4.1 Hasil Uji XRD TiO_2/ZnO

Gambar 4.1 menggambarkan hasil uji XRD pada semikonduktor TiO_2/ZnO . Analisis Hasil data dari uji XRD menggunakan *software* Origin Pro 2018b. Untuk hasil karakterisasi XRD memperlihatkan pola-pola difraksi TiO_2 yang bersesuaian dengan JCPDS No: 21-1272 (gambar 4.2a). Ini ditandai dengan munculnya puncak-puncak serapan dengan intensitas yang kuat terjadi berada pada daerah $2\theta = 25,35^\circ; 36,41^\circ; 37,96^\circ; 38,62^\circ; 48,06^\circ; 53,67^\circ; 55,22^\circ; 62,02^\circ; 62,79^\circ$; dan $68,22^\circ$. Hasil karakterisasi XRD pada Gambar 4.1 juga memperlihatkan pola-pola difraksi ZnO yang bersesuaian dengan JCPDS No: 36-1451 (gambar 4.2b). Ini ditandai dengan munculnya puncak-puncak serapan dengan intensitas yang kuat terjadi berada pada daerah $2\theta = 31,94^\circ; 35,11^\circ; 36,41^\circ; 48,06^\circ; 56,77^\circ; 62,79^\circ; 68,22^\circ$ dan $68,99^\circ$. Dari kedua pernyataan ini membuktikan bahwa hasil dari campuran tersebut positif mengandung TiO_2 dan ZnO



Gambar 4.2 Standart TiO_2 (a), Standart ZnO (b)

Sumber : Supplementary Material (ESI) (2011,p.01) (a), Elmorsi, dkk (2017,p.37)

Dari uji XRD pada semikonduktor TiO_2/ZnO didapatkan data dari 15 puncak. Adapun hasil perhitungan menggunakan persamaan (3-1) dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1
Hasil Perhitungan dengan Persamaan (3-1)

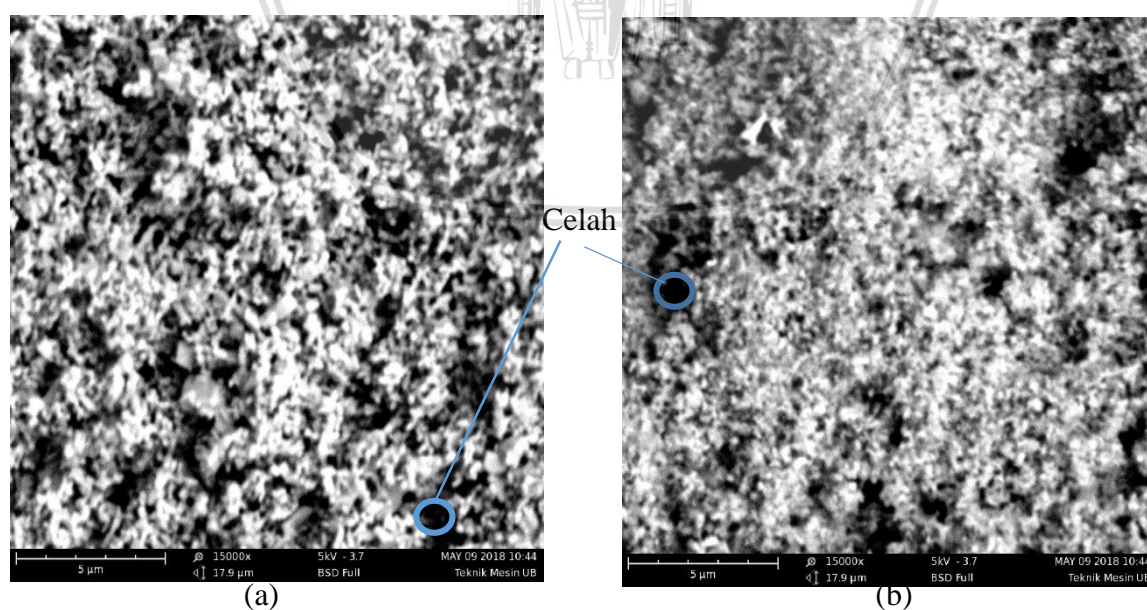
| Puncak ke- | 2θ ($^\circ$) | θ ($^\circ$) | $\cos \theta$ | FWHM ($^\circ$) | FWHM (rad) | D (nm) |
|------------|------------------------|-----------------------|---------------|-------------------|------------|---------|
| 1 | 25,35 | 12,677 | 0,976 | 0,530 | 0,00925 | 15,371 |
| 2 | 31,94 | 15,971 | 0,961 | 0,541 | 0,00944 | 15,282 |
| 3 | 33,11 | 16,553 | 0,959 | 0,529 | 0,00924 | 15,661 |
| 4 | 35,45 | 17,727 | 0,953 | 0,532 | 0,00929 | 15,668 |
| 5 | 36,41 | 18,206 | 0,950 | 0,529 | 0,00924 | 15,795 |
| 6 | 37,96 | 18,981 | 0,946 | 0,529 | 0,00924 | 15,871 |
| 7 | 48,06 | 24,031 | 0,913 | 0,534 | 0,00932 | 16,294 |
| 8 | 49,02 | 24,510 | 0,910 | 0,529 | 0,00924 | 16,498 |
| 9 | 53,67 | 26,835 | 0,892 | 0,529 | 0,00924 | 16,820 |
| 10 | 55,22 | 27,611 | 0,886 | 0,529 | 0,00924 | 16,932 |
| 11 | 56,77 | 28,386 | 0,880 | 0,530 | 0,00924 | 17,048 |
| 12 | 62,02 | 31,008 | 0,857 | 0,539 | 0,00941 | 17,196 |
| 13 | 62,79 | 31,395 | 0,854 | 0,538 | 0,00940 | 17,284 |
| 14 | 68,22 | 34,109 | 0,828 | 0,535 | 0,00934 | 17,928 |
| 15 | 68,99 | 34,496 | 0,824 | 0,535 | 0,00933 | 18,025 |
| Jumlah | | | | | | 211,718 |
| Rata-rata | | | | | | 16,286 |

Tabel 4.1 menunjukkan rata-rata ukuran kristal yang diperoleh dari TiO_2 yang di campur dengan ZnO adalah 16,286 nm. Menurut Abdullah (2008) untuk partikel berukuran

nanometer biasanya satu partikel hanya mengandung satu kristal. Jadi bisa dikatakan untuk semikonduktor TiO_2 (Sigma-Aldrich) yang memiliki ukuran partikel 21nm, juga memiliki ukuran kristal yang sama. Jika dibandingkan, ukuran kristal semikonduktor TiO_2/ZnO (16,286nm) yang relatif lebih kecil dari TiO_2 (21nm) menyebabkan arus yang dihasilkan lebih banyak. Hal ini dikarenakan koefisien difusi elektron semikonduktor TiO_2/ZnO lebih besar dibandingkan TiO_2 . Menurut Nakada, dkk (2005) dalam penelitiannya mengatakan bahwa ukuran kristal juga berpengaruh terhadap koefisien difusi elektron. Koefisien difusi elektron berkurang seiring peningkatan ukuran kristal yang menyebabkan proses konversi foton menjadi arus terjadi lebih lambat.

4.2 Analisa Hasil SEM

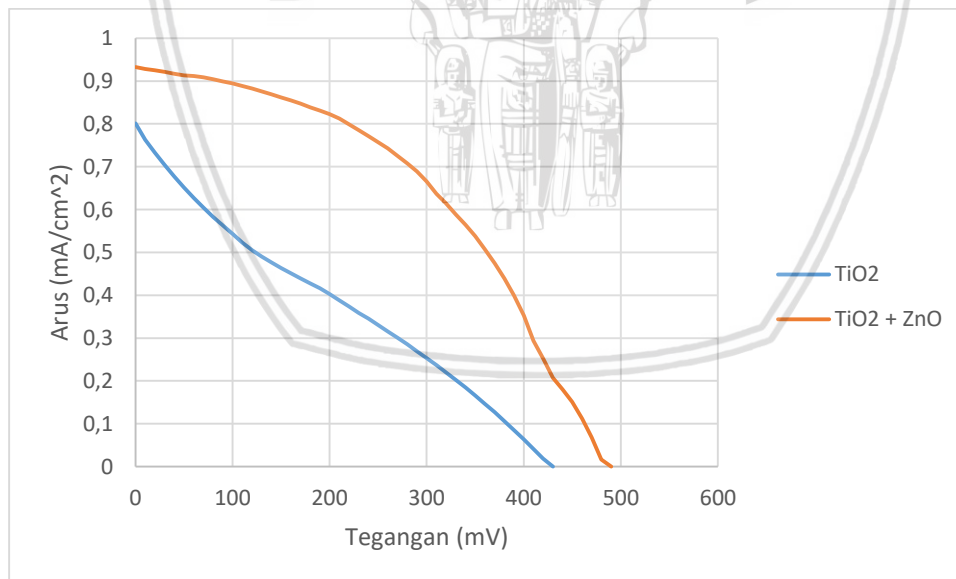
Gambar 4.3 menunjukkan hasil pengujian SEM untuk semikonduktor TiO_2/ZnO maupun TiO_2 . Karakterisasi menggunakan SEM untuk mengetahui bentuk permukaan dari material TiO_2/ZnO yang terbentuk. Jika dilihat menggunakan pembesaran 15.000x bentuk kristal yang terbentuk adalah bulat, hal ini bisa terjadi dikarenakan adanya pemanasan dengan suhu tinggi setelah mencampurkan TiO_2 dan ZnO dari bentuk pasta ke padat. Pada penelitian Purbandini dan Haris (2018) mengatakan bahwa TiO_2/ZnO memperlihatkan bentuk kristal yang tidak homogen dan teramati dengan bentuk membulat. Ketidak homogenan tersebut akibat adanya pemanasan yang tinggi.



Gambar 4.3 Hasil Uji SEM material TiO_2/ZnO (a), TiO_2 (b)

Jika dilihat dari hasil SEM, semikonduktor TiO_2/ZnO memiliki celah yang lebih banyak dibandingkan dengan TiO_2 . Dengan menggunakan *software* AutoCad dapat dihitung luasan celah tersebut. Untuk semikonduktor TiO_2/ZnO memiliki jumlah celah 19 dengan luas sebesar $0,5568 \mu\text{m}^2$. Dan untuk semikonduktor TiO_2 memiliki jumlah celah 14 dengan luas sebesar $0,0966 \mu\text{m}^2$. Celah ini lah yang nantinya berfungsi untuk tempat menempelnya molekul *dye*. Untuk mengadsorpsi *dye* sebanyak-banyaknya diperlukan celah atau pori yang banyak juga dengan tujuan memperbesar luas permukaan penyerapan. Jadi TiO_2/ZnO akan lebih unggul dalam penyerapan dibandingkan TiO_2 (Sigma-Aldrich) dikarenakan mempunyai celah yang lebih banyak. Pada penelitian yang dilakukan oleh Septina (2007) menganalisis jika celah yang terbentuk banyak maka *dye* yang terserap juga banyak pula. Dengan harapan, semakin banyak sinar matahari yang diserap maka energi listrik yang dihasilkan semakin besar pula. Dan dengan ditambahkan ZnO yang mampu membuat elektron bisa mengalir dengan cepat sehingga arus yang dihasilkan menjadi lebih tinggi serta meningkatkan efisiensi. Hasil ini sesuai dengan hasil dari uji solar simulator.

4.3 Analisa Hasil Uji Solar Simulator



Gambar 4.4 Karakteristik DSSC

Dapat dilihat pada gambar 4.1 bahwa DSSC dengan semikonduktor TiO_2/ZnO memiliki nilai arus sebesar $\pm 0,9 \text{ mA}$ sedangkan DSSC dengan semikonduktor TiO_2 hanya memiliki nilai arus sebesar $\pm 0,8 \text{ mA}$. Hal ini disebabkan karena material ZnO memiliki nilai mobilitas elektron yang tinggi sehingga arus yang dihasilkan tinggi.

Arus yang tinggi bisa didapatkan dari elektron yang dieksitasikan dari *dye* bisa didonorkan dan dialirkan dengan cepat oleh ZnO ke pita konduksi TiO_2 sehingga proses redoks akan semakin efektif. Pada penelitian yang dilakukan oleh Topayung (2011) mengatakan bahwa arus berbanding lurus dengan reaksi kimia, jadi jika reaksi redoks efektif maka arus yang dihasilkan juga besar pula. Pada penelitian yang dilakukan oleh Purbandini dan Haris (2018) mengatakan TiO_2 yang dicampur dengan ZnO dapat mengurangi laju rekombinasi pasangan elektron-hole, sehingga proses redoks akan semakin efektif. Terbukti bahwa dengan TiO_2 yang di campur ZnO bisa menurunkan kadar limbah logam berat dan senyawa organik lebih baik dibandingkan hanya menggunakan TiO_2 saja

Tabel 4.2
Hasil Uji Solar Simulator

| Pewarna | Semikonduktor | Voc(mV) | Isc(mA/cm ²) | Vmpp(mV) | Impp(mA/cm ²) | FF | η (%) |
|---------|---------------------------|---------|--------------------------|----------|---------------------------|-----|------------|
| Kunyit | TiO_2 | 428 | 0,8 | 240 | 345 | 0,2 | 0,083 |
| Kunyit | TiO_2/ZnO | 483 | 0,933 | 300 | 666 | 0,4 | 0,199 |

Tabel 4.1 menunjukkan efisisensi DSSC tertinggi didapatkan pada saat menggunakan pewarna alami dari ekstrak kunyit dan semikonduktor TiO_2/ZnO dengan nilai 0,199 %, sedangkan DSSC dengan semikonduktor TiO_2 memiliki efisiensi sebesar 0,083 %. Efisiensi DSSC merupakan rasio energi yang dihasilkan terhadap energi yang digunakan. Faktor yang menyebabkan efisiensi *solar cell* yang tinggi adalah Voc, Isc, dan FF yang dihasilkan tinggi. (BPPT, 2017)



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Berdasarkan hasil karakterisasi dengan XRD, terbukti bahwa ZnO telah mampu tercampurkan pada TiO_2 dengan ukuran kristal yang terbentuk pada TiO_2/ZnO sebesar 16,286 nm.
2. Berdasarkan hasil SEM, bentuk partikel semikonduktor TiO_2/ZnO yang dihasilkan berbentuk bulat dan memiliki celah yang lebih banyak dibandingkan dengan semikonduktor TiO_2
3. Berdasarkan hasil yang diperoleh DSSC yang menggunakan semikonduktor TiO_2/ZnO memiliki nilai efisiensi sebesar 0,199% lebih baik dibandingkan dengan DSSC menggunakan semikonduktor TiO_2 yang memiliki nilai hanya 0,083%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan penulis adalah :

1. Menggunakan semikonduktor TiO_2 dengan jenis *nanofiber*
2. Menggunakan variasi fraksi massa
3. Diusahakan saat proses pengujian kondisinya steril agar hasil lebih maksimal

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M., Khairurrijal. (2008). *Review: Karakterisasi Nanomaterial*. Jurnal Nanosains & Nanoteknologi. p. 1-9
- Arifin, Z., Soeparman, S., Widhiyanuriyawan, D., Suyitno, S. (2017). *Performance Enhancement of Dye-Sensitized Solar Cells Using a Natural Sensitizer*. International Journal of Photoenergy. p. 1-6
- BPPT. (2017). *Inisiatif Pengembangan Teknologi Energi Bersih*
- Chou, C. S., Chen, C. Y., Lin, S. H., Lu, W. H., Wu, P. (2015). *Preparation of TiO₂/Bamboo-Charcoal-Powder Composite Particles and Their Applications In Dye-Sensitized Solar Cells*. Advanced Powder Technology. p. 1-7
- Dwidjoseputro, D. (1989). *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*. Jakarta : Gramedia
- Elmorsi, T. M., Elsayed, M. H., Bakr, M. F. (2017). *Enhancing the Removal of Methylene Blue by a Modified ZnO Nanoparticles, Kinetics and Equilibrium Studies*. Journal Chemistry. p. 1-47
- ESI. (2011). *Supplementary Material for Nanoscale*. Journal The Royal Society of Chemistry. p. 1-3
- Faiz, M. R., Widhiyanuriyawan, D., Siswanto, E., Wardana, I.N.G. (2017). *Theoretical Study on the Application of Natural Green Pigment for Sensitizer in Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC)*. International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering.1 : p. 32-37
- Faiz, M. R., Widhiyanuriyawan, D., Siswanto, E., Wardana, I.N.G. (2017). *Theoretical study on the effect of solvents in chlorophyll solution for Dye-Sensitized Solar Cell*. International Conference on Chemistry and Material Science.299 : p. 1-6
- Flores, I.C., Freitas, J. N., Longo, C., Paoli, M. A. D., Winnischofer, H., Nogueira, A. F. (2007). *Dye-Sensitized Solar Cells Based on TiO₂ Nanotubes and A Solid-State Electrolyte*. Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry. 189(2-3) : p. 153-160
- Ganesh, T., Kim, J. H., Yoon, S. J., Kil, B. H., Maldar, N. N., Han, J. W., Han, S. H. (2010). *Photoactive Curcumin-Derived Dyes with Surface Anchoring Moieties Used in ZnO Nanoparticle-Based Dye-Sensitized Solar Cells*. Materials Chemistry and Physics. 123 : p. 62-66

- Gordon, R. G. (2000). *Criteria for Choosing Transparent Conductors*. MRS BULLETIN. p. 52-57
- Halme, J. (2002). *Dye-Sensitized Nanostructured and Organic Photovoltaic Cells: Technical Review and Preliminary Tests*. Thesis. Espoo: Helsinki University of Technology
- Handoko, P., Fajariyanti, Y. (2013). *Pengaruh Spektrum Cahaya Tampak Terhadap Laju Fotosintesis Tanaman Air Hydrilla Verticillata*. Seminar Nasional X Pendidikan Biologi FKIP UNS. p. 1-9
- Hongsith, K., Hongsith, N., Wongratanaphisan, D., Gardchareon, A., Phadungdhithidhada, S., Chooapun, S. (2015). *Efficiency Enhancement of ZnO Dye-sensitized Solar Cells by Modifying Photoelectrode and Counterelectrode*. Energy Procedia. p. 360-365
- Kay, A dan Gratzel, M. (1996). *Low Cost Photovoltaic Modules Based on Dye Sensitized Nanocrystalline Titanium Dioxide and Carbon Powder*. Solar Energy Materials and Solar Cells.44 : p. 99-117
- Kalyanasundaram, K dan Gratzel, M. (1998). *Applications of Functionalized Transition Metal Complexes in Photonic and Optoelectronic devices*. Coordination Chemistry Reviews. 77 : p. 347-414
- Kim, H. J., Kim, D. J., Karthick, S. N., Hemalatha, K. V., Raj, C. J., Ok, S., Choe, Y. (2013). *Curcumin Dye Extracted from Curcuma longa L. Used as Sensitizers for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells*. International Journal of Electrochemical Science. p. 8320 - 8328
- Kong, F. T., Dai, S. Y., Wang, K. J. (2007). *Review of Recent Progress in Dye-Sensitized Solar Cells*. Advances in Opto Electronics. p. 1-14
- Kumara, G.R.A., Kaneko, S., Okuya, M., Agyeman, B. O., Konno, A., Tennakone, K. (2006). *Shiso Leaf Pigments for Dye-Sensitized Solid-State Solar Cell*. Solar Energy Materials & Solar Cells. 90 : p. 1220 – 1226
- Kumar, A dan Zhou, C. (2010). *The Race To Replace Tin-Doped Indium Oxide: Which Material Will Win?*. Acsnano. 4 : p. 11-14
- Manan, S. (2009). *Energi Matahari, Sumber Energi Alternatif yang Effisien, Handal dan Ramah Lingkungan di Indonesia*. Solar Energy. p. 31-35
- Nakade S., Kanzaki T., Kubo W., Kitamura T., Wada Y., Yanagida S. (2005). *Role of Electrolytes on Charge Recombination in Dye-Sensitized TiO₂ Solar Cell (I): The Case of Solar Cells Using the I⁻/I₃⁻ Redox Couple*. Journal Physical and Chemical. p. 3480-3487

- Purbandini, S. R dan Haris, A. (2018). *Effect of ZnO Dopant on TiO₂ on Simultaneous Decrease of Phenol, Pb(II) and COD using Photocatalysis Method*. Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi. 21 (1) : p. 34 – 38
- Ruhane, T. A., Islam, M. T., Rahaman, M. S., Bhuiyan, M. M. H., Islam, J. M. M., Newaz, M.K., Khan, K. A., Khan, M. A. (2017). *Photo Current Enhancement of Natural Dye Sensitized Solar Cell by Optimizing Dye Extraction and Its Loading Period*. Optik. 149 : p. 174–183
- Santoso, A. A. (2013). *Studi Pengaruh Konsentrasi Larutan Prekursor dan Temperatur Sintering pada Pembuatan Kaca Konduktif Sebagai Komponen Sel Surya Tersensitisasi Pewarna*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Surakarta: Universitas Sebelas maret.
- Sastrawan, R. (2006). *Photovoltaic Modules of Dye Solar Cells*. Disertasi. Breisgau: Universitas Freiburg
- Septina, W., Fajarisandi, D., Aditia, M. (2007). *Pembuatan Prototipe Solar Cell Murah dengan Bahan Organik-Inorganik (Dye-sensitized Solar Cell)*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Bandung: Institut Teknologi Bandung
- Setiabudi, A., Hardian, R., Muzakir, A. (2012). *Karakterisasi Material; Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia*. Bandung : UPI PRESS
- Setiawan, S. (2014). *Studi Model Bisnis dan Kemampuan Teknologi Industri PLTS Menuju Kemandirian Energi*. Seri Laporan Teknis Penelitian No. : 2015-01-01-08, LIPI
- Sima, C., Grigoriu, C., Antohe, S. (2010). *Comparison of the dye-sensitized solar cells performances based on transparent conductive ITO and FTO*. International Journal of Thin Solid Films. 519 : p. 595–597
- Souad, A. M. A., Alaei, I., Sopyan, I. (2013). *Natural Photosensitizers for Dye Sensitized Solar Cells*. International Journal of Renewable Energy Research. 3(I) : p. 139-143
- Sujinnapram, S dan Mounsrijun, S. (2015). *Additive SnO₂-ZnO Composite Photoanode for Improvement of Power Conversion Efficiency in Dye-Sensitized Solar Cell*. Procedia Manufacturing. p. 108-112
- Takada, H., Obana, Y., Sasaki, R., Kuribayashi, M., Kanno, M., Zhu, C., Bessho, T., Takagi, Y., Hinokuma, K., Noda, K. (2015). *Improved Durability of Dye-Sensitized Solar Cell with H₂-Reduced Carbon Counter Electrode*. Journal of Power Sources. p. 1276-1282

- Taya, S. A., Agez, T. M. E., Ghamri, H. S. E., Latif, M. S. A. (2013). *Dye-Sensitized Solar Cells Using Fresh and Dried Natural Dyes*. International Journal of Materials Science and Applications. p. 37-42
- Wolfbauer, G., Bond, A. M., Eklund, J. C., Farlane, D. R. M. (2001). *A Channel Flow Cell System Specifically Designed to Test The Efficiency of Redox Shuttles in Dye Sensitized Solar Cells*. Solar Energy Materials and Solar Cells. 70 : p. 85 -101
- Wu, J., Hao, S., Huang, Y., Lin, J. (2006). *Natural Dyes as Photosensitizers for Dye-Sensitized Solar Cell*. Solar Energy. 80 : p. 209–214
- Yuda, A.V. (2016). *Uji Stabilitas Curcumin Sebagai Natural Dye Untuk Photosensitizer Pada Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Surakarta: Universitas Sebelas maret.
- Zebib, B., Mouloungui, Z., Noirot, V. (2010). *Stabilization of Curcumin by Complexation With Divalent Cations in Glycerol/Water System*. Bioinorganic Chemistry And Applications. p. 1-9
- Zhang, H dan Banfield, J. F. (2000). *Understanding Polymorphic Phase Transformation Behavior during Growth of Nanocrystalline Aggregates: Insights from TiO₂*. Journal Phisycal and Chemical. p. 3481 -3487
- Zhang, W., Fang, Z., Su, M., Saeys, M., Liu, B. (2009). *A Triphenylamine-Based Conjugated Polymer with Donor- p-Acceptor Architecture as Organic Sensitizer for Dye-Sensitized Solar Cells*. Journal Macromolecular. p. 1-5
- Zhou, H., Wu, L., Gao, Y., Ma, T. (2011). *Dye-Sensitized Solar Cells Using 20 Natural Dyes as Sensitizers*. Journal of Photochemistry and Photobiology. p. 188-194

LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Hasil Uji XRD

| | | | |
|--------------|---|---------|-----------|
| Sample Name: | Sampel Falih Perkoso Teknik Mesin (Univ Barwijaya Malang) T | | |
| Comment: | Converted by x_port from DIFFRAC-PLUS. | | |
| Date : | 18/05/2018 | | |
| Time : | 13:39:57 | | |
| 2 Theta | Intensity | 2 Theta | Intensity |
| 10 | 239 | 50,0169 | 179 |
| 10,1105 | 196 | 50,1275 | 183 |
| 10,2211 | 184 | 50,238 | 214 |
| 10,3316 | 193 | 50,3486 | 215 |
| 10,4422 | 206 | 50,4591 | 273 |
| 10,5527 | 218 | 50,5696 | 216 |
| 10,6633 | 218 | 50,6802 | 192 |
| 10,7738 | 228 | 50,7907 | 177 |
| 10,8844 | 218 | 50,9013 | 176 |
| 10,9949 | 207 | 51,0118 | 171 |
| 11,1054 | 202 | 51,1224 | 186 |
| 11,216 | 241 | 51,2329 | 179 |
| 11,3265 | 353 | 51,3435 | 170 |
| 11,4371 | 315 | 51,454 | 163 |
| 11,5476 | 254 | 51,5645 | 164 |
| 11,6582 | 212 | 51,6751 | 178 |
| 11,7687 | 216 | 51,7856 | 174 |
| 11,8792 | 211 | 51,8962 | 200 |
| 11,9898 | 202 | 52,0067 | 179 |
| 12,1003 | 207 | 52,1173 | 200 |
| 12,2109 | 196 | 52,2278 | 182 |
| 12,3214 | 236 | 52,3384 | 164 |
| 12,432 | 203 | 52,4489 | 177 |
| 12,5425 | 199 | 52,5594 | 192 |
| 12,6531 | 181 | 52,67 | 195 |
| 12,7636 | 201 | 52,7805 | 219 |
| 12,8741 | 236 | 52,8911 | 232 |
| 12,9847 | 195 | 53,0016 | 263 |
| 13,0952 | 226 | 53,1122 | 341 |
| 13,2058 | 191 | 53,2227 | 404 |
| 13,3163 | 197 | 53,3332 | 551 |
| 13,4269 | 242 | 53,4438 | 931 |
| 13,5374 | 225 | 53,5543 | 1870 |
| 13,648 | 208 | 53,6649 | 1571 |
| 13,7585 | 230 | 53,7754 | 1005 |
| 13,869 | 225 | 53,886 | 713 |

| | | | |
|---------|-----|---------|-----|
| 13,9796 | 198 | 53,9965 | 776 |
| 14,0901 | 200 | 54,1071 | 800 |
| 14,2007 | 203 | 54,2176 | 790 |
| 14,3112 | 225 | 54,3281 | 829 |
| 14,4218 | 215 | 54,4387 | 974 |
| 14,5323 | 198 | 54,5492 | 765 |
| 14,6428 | 202 | 54,6598 | 564 |
| 14,7534 | 204 | 54,7703 | 419 |
| 14,8639 | 188 | 54,8809 | 424 |
| 14,9745 | 181 | 54,9914 | 494 |
| 15,085 | 195 | 55,102 | 663 |
| 15,1956 | 220 | 55,2125 | 703 |
| 15,3061 | 218 | 55,323 | 582 |
| 15,4167 | 196 | 55,4336 | 455 |
| 15,5272 | 209 | 55,5441 | 283 |
| 15,6377 | 223 | 55,6547 | 263 |
| 15,7483 | 209 | 55,7652 | 290 |
| 15,8588 | 219 | 55,8758 | 247 |
| 15,9694 | 227 | 55,9863 | 229 |
| 16,0799 | 185 | 56,0968 | 230 |
| 16,1905 | 212 | 56,2074 | 260 |
| 16,301 | 199 | 56,3179 | 267 |
| 16,4116 | 243 | 56,4285 | 281 |
| 16,5221 | 235 | 56,539 | 373 |
| 16,6326 | 208 | 56,6496 | 583 |
| 16,7432 | 217 | 56,7601 | 912 |
| 16,8537 | 192 | 56,8707 | 878 |
| 16,9643 | 203 | 56,9812 | 884 |
| 17,0748 | 221 | 57,0917 | 645 |
| 17,1854 | 182 | 57,2023 | 400 |
| 17,2959 | 215 | 57,3128 | 230 |
| 17,4064 | 207 | 57,4234 | 188 |
| 17,517 | 170 | 57,5339 | 186 |
| 17,6275 | 197 | 57,6445 | 160 |
| 17,7381 | 198 | 57,755 | 156 |
| 17,8486 | 206 | 57,8656 | 145 |
| 17,9592 | 205 | 57,9761 | 147 |
| 18,0697 | 186 | 58,0866 | 151 |
| 18,1803 | 247 | 58,1972 | 176 |
| 18,2908 | 205 | 58,3077 | 167 |
| 18,4013 | 216 | 58,4183 | 192 |
| 18,5119 | 175 | 58,5288 | 148 |
| 18,6224 | 209 | 58,6394 | 189 |
| 18,733 | 202 | 58,7499 | 180 |
| 18,8435 | 232 | 58,8604 | 155 |
| 18,9541 | 216 | 58,971 | 177 |
| 19,0646 | 210 | 59,0815 | 170 |

| | | | |
|---------|------|---------|------|
| 19,1752 | 197 | 59,1921 | 169 |
| 19,2857 | 211 | 59,3026 | 175 |
| 19,3962 | 216 | 59,4132 | 171 |
| 19,5068 | 170 | 59,5237 | 164 |
| 19,6173 | 216 | 59,6343 | 181 |
| 19,7279 | 199 | 59,7448 | 149 |
| 19,8384 | 216 | 59,8553 | 155 |
| 19,949 | 208 | 59,9659 | 167 |
| 20,0595 | 197 | 60,0764 | 153 |
| 20,17 | 227 | 60,187 | 143 |
| 20,2806 | 200 | 60,2975 | 180 |
| 20,3911 | 226 | 60,4081 | 148 |
| 20,5017 | 217 | 60,5186 | 162 |
| 20,6122 | 195 | 60,6292 | 158 |
| 20,7228 | 212 | 60,7397 | 202 |
| 20,8333 | 214 | 60,8502 | 177 |
| 20,9439 | 230 | 60,9608 | 173 |
| 21,0544 | 211 | 61,0713 | 168 |
| 21,1649 | 216 | 61,1819 | 178 |
| 21,2755 | 316 | 61,2924 | 224 |
| 21,386 | 266 | 61,403 | 269 |
| 21,4966 | 221 | 61,5135 | 261 |
| 21,6071 | 237 | 61,624 | 325 |
| 21,7177 | 197 | 61,7346 | 548 |
| 21,8282 | 209 | 61,8451 | 1134 |
| 21,9388 | 214 | 61,9557 | 1512 |
| 22,0493 | 236 | 62,0662 | 1131 |
| 22,1598 | 220 | 62,1768 | 663 |
| 22,2704 | 214 | 62,2873 | 374 |
| 22,3809 | 218 | 62,3979 | 344 |
| 22,4915 | 194 | 62,5084 | 351 |
| 22,602 | 233 | 62,6189 | 493 |
| 22,7126 | 240 | 62,7295 | 613 |
| 22,8231 | 215 | 62,84 | 757 |
| 22,9336 | 213 | 62,9506 | 944 |
| 23,0442 | 231 | 63,0611 | 736 |
| 23,1547 | 211 | 63,1717 | 619 |
| 23,2653 | 206 | 63,2822 | 471 |
| 23,3758 | 213 | 63,3928 | 726 |
| 23,4864 | 247 | 63,5033 | 1519 |
| 23,5969 | 243 | 63,6138 | 990 |
| 23,7075 | 279 | 63,7244 | 713 |
| 23,818 | 347 | 63,8349 | 343 |
| 23,9285 | 573 | 63,9455 | 197 |
| 24,0391 | 1433 | 64,056 | 231 |
| 24,1496 | 893 | 64,1666 | 284 |
| 24,2602 | 364 | 64,2771 | 205 |

| | | | |
|---------|------|---------|-----|
| 24,3707 | 296 | 64,3876 | 199 |
| 24,4813 | 300 | 64,4982 | 183 |
| 24,5918 | 295 | 64,6087 | 168 |
| 24,7024 | 352 | 64,7193 | 154 |
| 24,8129 | 358 | 64,8298 | 137 |
| 24,9234 | 480 | 64,9404 | 151 |
| 25,034 | 552 | 65,0509 | 158 |
| 25,1445 | 870 | 65,1615 | 131 |
| 25,2551 | 1566 | 65,272 | 150 |
| 25,3656 | 2818 | 65,3825 | 204 |
| 25,4762 | 3348 | 65,4931 | 203 |
| 25,5867 | 2278 | 65,6036 | 159 |
| 25,6972 | 1078 | 65,7142 | 143 |
| 25,8078 | 586 | 65,8247 | 143 |
| 25,9183 | 481 | 65,9353 | 143 |
| 26,0289 | 369 | 66,0458 | 134 |
| 26,1394 | 314 | 66,1564 | 152 |
| 26,25 | 313 | 66,2669 | 147 |
| 26,3605 | 317 | 66,3774 | 149 |
| 26,4711 | 310 | 66,488 | 188 |
| 26,5816 | 298 | 66,5985 | 163 |
| 26,6921 | 301 | 66,7091 | 174 |
| 26,8027 | 315 | 66,8196 | 147 |
| 26,9132 | 328 | 66,9302 | 134 |
| 27,0238 | 307 | 67,0407 | 149 |
| 27,1343 | 340 | 67,1512 | 167 |
| 27,2449 | 412 | 67,2618 | 156 |
| 27,3554 | 520 | 67,3723 | 132 |
| 27,466 | 895 | 67,4829 | 169 |
| 27,5765 | 1379 | 67,5934 | 152 |
| 27,687 | 1007 | 67,704 | 165 |
| 27,7976 | 492 | 67,8145 | 189 |
| 27,9081 | 351 | 67,9251 | 200 |
| 28,0187 | 331 | 68,0356 | 419 |
| 28,1292 | 277 | 68,1461 | 335 |
| 28,2398 | 296 | 68,2567 | 305 |
| 28,3503 | 306 | 68,3672 | 209 |
| 28,4608 | 292 | 68,4778 | 219 |
| 28,5714 | 299 | 68,5883 | 246 |
| 28,6819 | 310 | 68,6989 | 312 |
| 28,7925 | 294 | 68,8094 | 453 |
| 28,903 | 285 | 68,92 | 548 |
| 29,0136 | 290 | 69,0305 | 572 |
| 29,1241 | 257 | 69,141 | 555 |
| 29,2347 | 285 | 69,2516 | 483 |
| 29,3452 | 304 | 69,3621 | 402 |
| 29,4557 | 310 | 69,4727 | 254 |

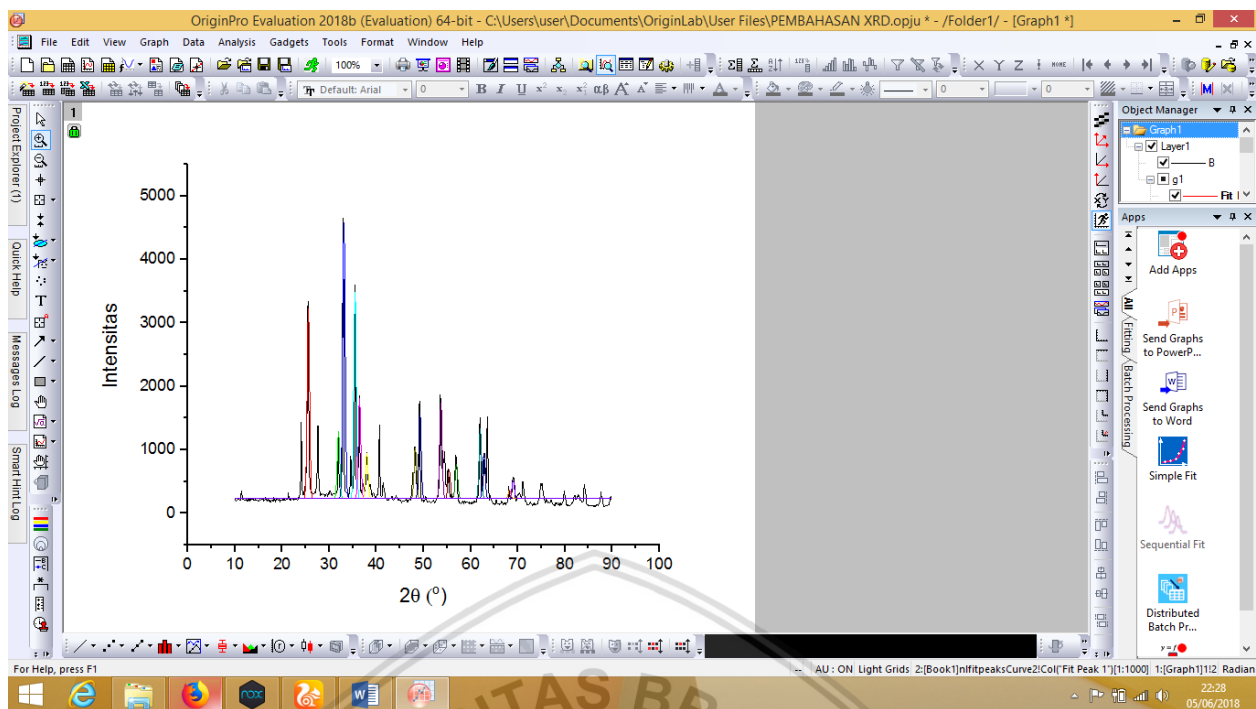
| | | | |
|---------|------|---------|-----|
| 29,5663 | 289 | 69,5832 | 186 |
| 29,6768 | 264 | 69,6938 | 203 |
| 29,7874 | 324 | 69,8043 | 247 |
| 29,8979 | 296 | 69,9148 | 291 |
| 30,0085 | 314 | 70,0254 | 273 |
| 30,119 | 354 | 70,1359 | 286 |
| 30,2296 | 325 | 70,2465 | 308 |
| 30,3401 | 322 | 70,357 | 316 |
| 30,4506 | 300 | 70,4676 | 300 |
| 30,5612 | 273 | 70,5781 | 286 |
| 30,6717 | 303 | 70,6887 | 242 |
| 30,7823 | 312 | 70,7992 | 254 |
| 30,8928 | 310 | 70,9097 | 293 |
| 31,0034 | 300 | 71,0203 | 506 |
| 31,1139 | 315 | 71,1308 | 446 |
| 31,2244 | 308 | 71,2414 | 365 |
| 31,335 | 326 | 71,3519 | 334 |
| 31,4455 | 310 | 71,4625 | 261 |
| 31,5561 | 320 | 71,573 | 185 |
| 31,6666 | 360 | 71,6836 | 195 |
| 31,7772 | 545 | 71,7941 | 170 |
| 31,8877 | 1268 | 71,9046 | 141 |
| 31,9983 | 885 | 72,0152 | 124 |
| 32,1088 | 402 | 72,1257 | 136 |
| 32,2193 | 454 | 72,2363 | 135 |
| 32,3299 | 458 | 72,3468 | 133 |
| 32,4404 | 439 | 72,4574 | 148 |
| 32,551 | 529 | 72,5679 | 165 |
| 32,6615 | 732 | 72,6784 | 178 |
| 32,7721 | 1650 | 72,789 | 144 |
| 32,8826 | 4652 | 72,8995 | 144 |
| 32,9932 | 4382 | 73,0101 | 138 |
| 33,1037 | 1260 | 73,1206 | 117 |
| 33,2142 | 531 | 73,2312 | 145 |
| 33,3248 | 400 | 73,3417 | 140 |
| 33,4353 | 329 | 73,4523 | 157 |
| 33,5459 | 338 | 73,5628 | 122 |
| 33,6564 | 314 | 73,6733 | 144 |
| 33,767 | 327 | 73,7839 | 130 |
| 33,8775 | 326 | 73,8944 | 126 |
| 33,988 | 307 | 74,005 | 150 |
| 34,0986 | 260 | 74,1155 | 159 |
| 34,2091 | 304 | 74,2261 | 141 |
| 34,3197 | 354 | 74,3366 | 189 |
| 34,4302 | 452 | 74,4472 | 215 |
| 34,5408 | 904 | 74,5577 | 227 |
| 34,6513 | 676 | 74,6682 | 285 |

| | | | |
|---------|------|---------|-----|
| 34,7619 | 407 | 74,7788 | 466 |
| 34,8724 | 379 | 74,8893 | 427 |
| 34,9829 | 392 | 74,9999 | 453 |
| 35,0935 | 441 | 75,1104 | 477 |
| 35,204 | 708 | 75,221 | 407 |
| 35,3146 | 1227 | 75,3315 | 342 |
| 35,4251 | 3592 | 75,442 | 296 |
| 35,5357 | 2891 | 75,5526 | 244 |
| 35,6462 | 1003 | 75,6631 | 201 |
| 35,7568 | 472 | 75,7737 | 169 |
| 35,8673 | 461 | 75,8842 | 155 |
| 35,9778 | 457 | 75,9948 | 214 |
| 36,0884 | 653 | 76,1053 | 206 |
| 36,1989 | 937 | 76,2159 | 191 |
| 36,3095 | 1392 | 76,3264 | 164 |
| 36,42 | 1846 | 76,4369 | 181 |
| 36,5306 | 827 | 76,5475 | 178 |
| 36,6411 | 384 | 76,658 | 173 |
| 36,7516 | 319 | 76,7686 | 165 |
| 36,8622 | 363 | 76,8791 | 176 |
| 36,9727 | 364 | 76,9897 | 210 |
| 37,0833 | 446 | 77,1002 | 212 |
| 37,1938 | 466 | 77,2108 | 173 |
| 37,3044 | 405 | 77,3213 | 150 |
| 37,4149 | 341 | 77,4318 | 135 |
| 37,5255 | 338 | 77,5424 | 130 |
| 37,636 | 412 | 77,6529 | 116 |
| 37,7465 | 503 | 77,7635 | 131 |
| 37,8571 | 756 | 77,874 | 112 |
| 37,9676 | 952 | 77,9846 | 158 |
| 38,0782 | 732 | 78,0951 | 165 |
| 38,1887 | 593 | 78,2056 | 139 |
| 38,2993 | 464 | 78,3162 | 160 |
| 38,4098 | 425 | 78,4267 | 129 |
| 38,5204 | 416 | 78,5373 | 131 |
| 38,6309 | 460 | 78,6478 | 125 |
| 38,7414 | 425 | 78,7584 | 163 |
| 38,852 | 355 | 78,8689 | 109 |
| 38,9625 | 302 | 78,9795 | 155 |
| 39,0731 | 262 | 79,09 | 154 |
| 39,1836 | 298 | 79,2005 | 124 |
| 39,2942 | 329 | 79,3111 | 145 |
| 39,4047 | 319 | 79,4216 | 152 |
| 39,5152 | 281 | 79,5322 | 180 |
| 39,6258 | 275 | 79,6427 | 195 |
| 39,7363 | 236 | 79,7533 | 284 |
| 39,8469 | 243 | 79,8638 | 343 |

| | | | |
|---------|------|---------|-----|
| 39,9574 | 256 | 79,9744 | 261 |
| 40,068 | 290 | 80,0849 | 274 |
| 40,1785 | 283 | 80,1954 | 165 |
| 40,2891 | 295 | 80,306 | 129 |
| 40,3996 | 409 | 80,4165 | 132 |
| 40,5101 | 825 | 80,5271 | 109 |
| 40,6207 | 1391 | 80,6376 | 137 |
| 40,7312 | 799 | 80,7482 | 110 |
| 40,8418 | 346 | 80,8587 | 121 |
| 40,9523 | 270 | 80,9692 | 124 |
| 41,0629 | 262 | 81,0798 | 120 |
| 41,1734 | 273 | 81,1903 | 128 |
| 41,284 | 389 | 81,3009 | 137 |
| 41,3945 | 478 | 81,4114 | 147 |
| 41,505 | 431 | 81,522 | 175 |
| 41,6156 | 379 | 81,6325 | 157 |
| 41,7261 | 353 | 81,7431 | 201 |
| 41,8367 | 257 | 81,8536 | 237 |
| 41,9472 | 242 | 81,9641 | 273 |
| 42,0578 | 235 | 82,0747 | 284 |
| 42,1683 | 243 | 82,1852 | 257 |
| 42,2788 | 208 | 82,2958 | 217 |
| 42,3894 | 199 | 82,4063 | 219 |
| 42,4999 | 201 | 82,5169 | 254 |
| 42,6105 | 213 | 82,6274 | 259 |
| 42,721 | 228 | 82,738 | 293 |
| 42,8316 | 226 | 82,8485 | 261 |
| 42,9421 | 236 | 82,959 | 272 |
| 43,0527 | 224 | 83,0696 | 262 |
| 43,1632 | 239 | 83,1801 | 216 |
| 43,2737 | 267 | 83,2907 | 193 |
| 43,3843 | 250 | 83,4012 | 206 |
| 43,4948 | 205 | 83,5118 | 173 |
| 43,6054 | 207 | 83,6223 | 175 |
| 43,7159 | 210 | 83,7328 | 176 |
| 43,8265 | 213 | 83,8434 | 188 |
| 43,937 | 247 | 83,9539 | 280 |
| 44,0476 | 249 | 84,0645 | 441 |
| 44,1581 | 272 | 84,175 | 444 |
| 44,2686 | 260 | 84,2856 | 298 |
| 44,3792 | 250 | 84,3961 | 318 |
| 44,4897 | 234 | 84,5067 | 176 |
| 44,6003 | 208 | 84,6172 | 133 |
| 44,7108 | 226 | 84,7277 | 138 |
| 44,8214 | 195 | 84,8383 | 132 |
| 44,9319 | 197 | 84,9488 | 107 |
| 45,0424 | 194 | 85,0594 | 124 |

| | | | |
|---------|------|---------|-----|
| 45,153 | 197 | 85,1699 | 110 |
| 45,2635 | 188 | 85,2805 | 113 |
| 45,3741 | 156 | 85,391 | 117 |
| 45,4846 | 195 | 85,5016 | 120 |
| 45,5952 | 202 | 85,6121 | 111 |
| 45,7057 | 191 | 85,7226 | 121 |
| 45,8163 | 195 | 85,8332 | 117 |
| 45,9268 | 193 | 85,9437 | 109 |
| 46,0373 | 204 | 86,0543 | 107 |
| 46,1479 | 205 | 86,1648 | 120 |
| 46,2584 | 194 | 86,2754 | 107 |
| 46,369 | 218 | 86,3859 | 119 |
| 46,4795 | 206 | 86,4964 | 102 |
| 46,5901 | 162 | 86,607 | 116 |
| 46,7006 | 207 | 86,7175 | 133 |
| 46,8112 | 193 | 86,8281 | 132 |
| 46,9217 | 203 | 86,9386 | 139 |
| 47,0322 | 227 | 87,0492 | 114 |
| 47,1428 | 231 | 87,1597 | 154 |
| 47,2533 | 205 | 87,2703 | 171 |
| 47,3639 | 266 | 87,3808 | 177 |
| 47,4744 | 300 | 87,4913 | 220 |
| 47,585 | 462 | 87,6019 | 332 |
| 47,6955 | 648 | 87,7124 | 263 |
| 47,806 | 569 | 87,823 | 256 |
| 47,9166 | 555 | 87,9335 | 222 |
| 48,0271 | 808 | 88,0441 | 139 |
| 48,1377 | 1055 | 88,1546 | 135 |
| 48,2482 | 1026 | 88,2652 | 104 |
| 48,3588 | 706 | 88,3757 | 105 |
| 48,4693 | 521 | 88,4862 | 116 |
| 48,5799 | 411 | 88,5968 | 116 |
| 48,6904 | 329 | 88,7073 | 124 |
| 48,8009 | 416 | 88,8179 | 120 |
| 48,9115 | 641 | 88,9284 | 115 |
| 49,022 | 1459 | 89,039 | 122 |
| 49,1326 | 1766 | 89,1495 | 129 |
| 49,2431 | 1039 | 89,26 | 122 |
| 49,3537 | 373 | 89,3706 | 144 |
| 49,4642 | 252 | 89,4811 | 201 |
| 49,5748 | 217 | 89,5917 | 207 |
| 49,6853 | 191 | 89,7022 | 270 |
| 49,7958 | 201 | 89,8128 | 222 |
| 49,9064 | 213 | 89,9233 | 201 |

Lampiran 2 Pengolahan Data Hasil Uji XRD dengan *Software* Origins Pro 2018b

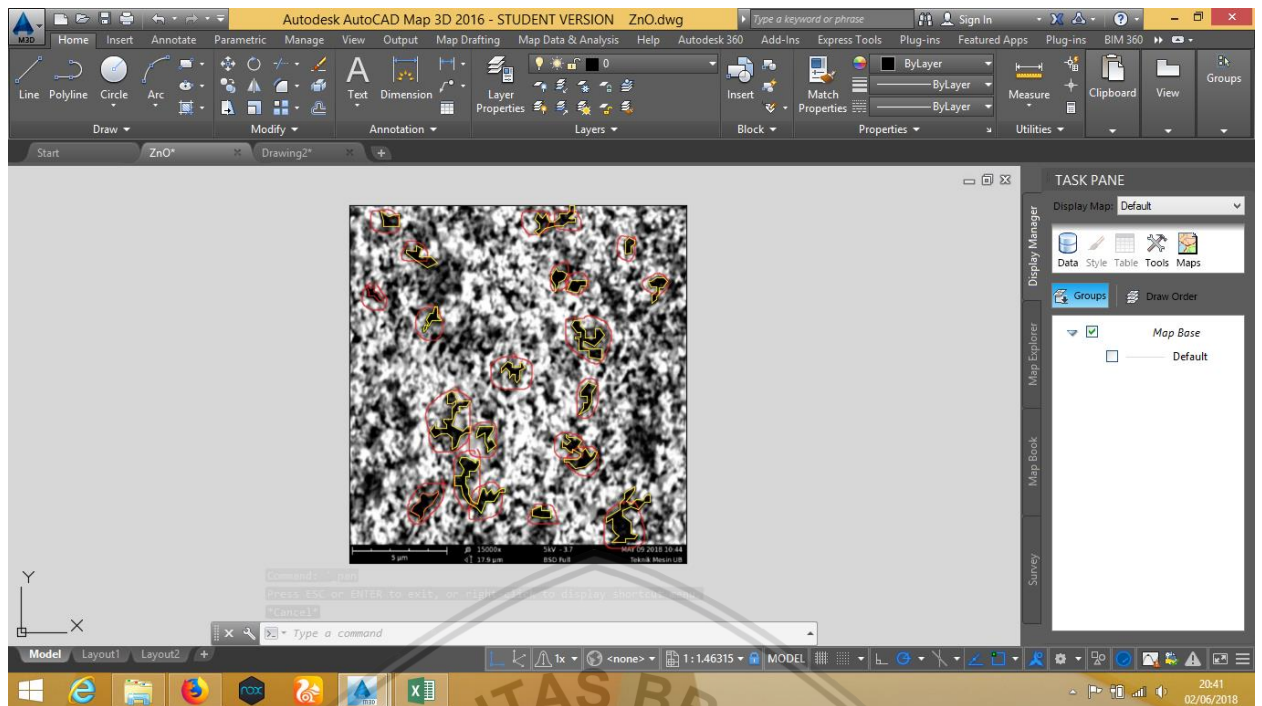


Lampiran 3 Data dari Grafik Hasil Uji XRD

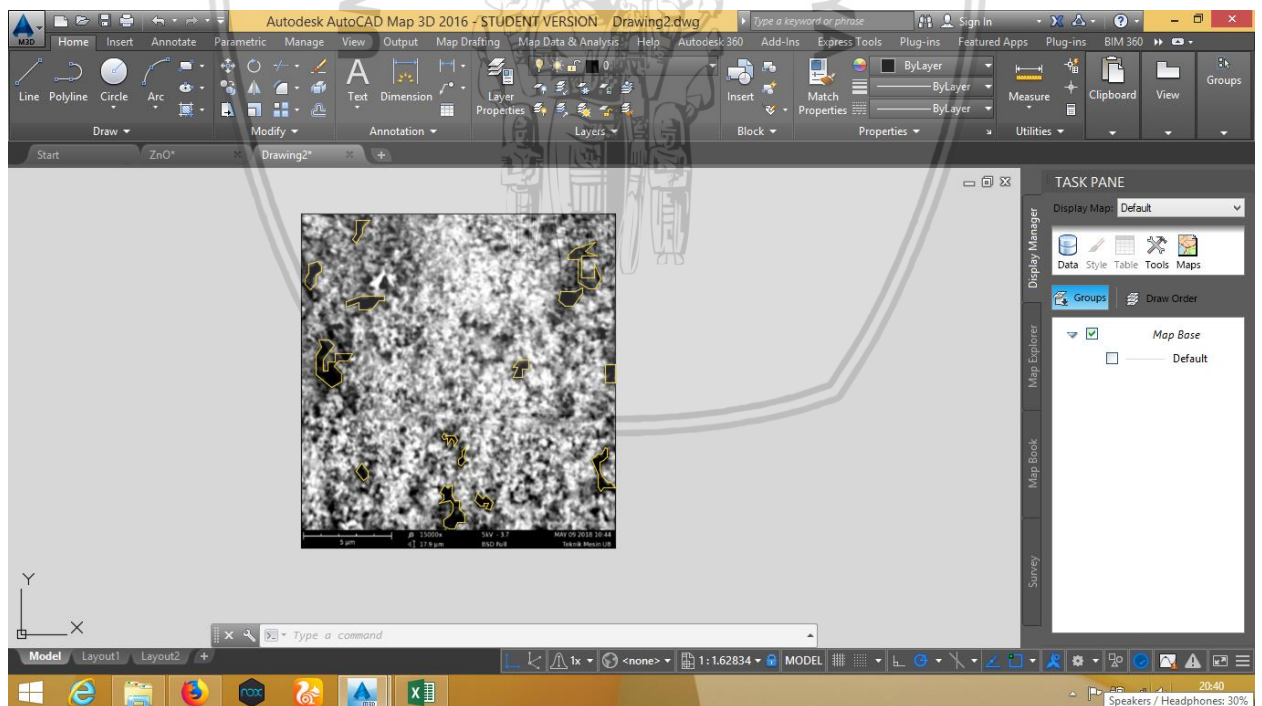
| | | Value | Standard Error | t-Value | Prob> t | Dependency |
|----------|--------|------------|----------------|------------|-------------|------------|
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 25,3534 | 0,01806 | 1403,99413 | 0 | 9,26767E-9 |
| | w | 0,44994 | 0,03623 | 12,41886 | 4,72207E-32 | 0,33745 |
| Peak1(B) | A | 1943,96363 | 136,40007 | 14,25193 | 1,67156E-40 | 0,3456 |
| | sigma | 0,22497 | 0,01812 | | | |
| | FWHM | 0,52976 | 0,04266 | | | |
| | Height | 3447,27191 | 239,90167 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 31,94254 | 0,05555 | 575,03552 | 0 | 0,00198 |
| | w | 0,45924 | 0,11181 | 4,10728 | 4,49265E-5 | 0,34303 |
| Peak2(B) | A | 652,29112 | 138,04514 | 4,7252 | 2,79611E-6 | 0,34792 |
| | sigma | 0,22962 | 0,05591 | | | |
| | FWHM | 0,54071 | 0,13165 | | | |
| | Height | 1133,30414 | 237,73998 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 33,10534 | 0,01255 | 2637,76683 | 0 | 0,00204 |
| | w | 0,44947 | 0,02525 | 17,79726 | 1,97823E-58 | 0,34296 |
| Peak3(B) | A | 2795,71065 | 136,54597 | 20,4745 | 6,65808E-73 | 0,34774 |
| | sigma | 0,22473 | 0,01263 | | | |
| | FWHM | 0,52921 | 0,02974 | | | |
| | Height | 4962,86817 | 240,26811 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 35,45372 | 0,01675 | 2116,52958 | 0 | 0,03997 |
| | w | 0,4521 | 0,03473 | 13,01842 | 9,64408E-35 | 0,40438 |
| Peak4(B) | A | 2154,36437 | 141,09189 | 15,26923 | 1,84632E-45 | 0,38544 |
| | sigma | 0,22605 | 0,01736 | | | |
| | FWHM | 0,53231 | 0,04089 | | | |
| | Height | 3802,11903 | 241,3958 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 36,41131 | 0,03397 | 1071,86785 | 0 | 0,04018 |
| | w | 0,4497 | 0,07041 | 6,38687 | 3,14412E-10 | 0,40417 |
| Peak5(B) | A | 1053,96911 | 140,71576 | 7,49006 | 2,15182E-13 | 0,38545 |
| | sigma | 0,22485 | 0,03521 | | | |
| | FWHM | 0,52948 | 0,0829 | | | |
| | Height | 1870,00684 | 242,01429 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 37,9617 | 0,08121 | 467,46654 | 0 | 3,2113E-7 |
| | w | 0,44957 | 0,16292 | 2,7595 | 0,00595 | 0,33743 |
| Peak6(B) | A | 431,76024 | 136,34294 | 3,16672 | 0,00161 | 0,34557 |
| | sigma | 0,22479 | 0,08146 | | | |
| | FWHM | 0,52933 | 0,19182 | | | |
| | Height | 766,27487 | 239,99815 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 48,06202 | 0,07394 | 649,9751 | 0 | 0,04051 |
| | w | 0,4534 | 0,15336 | 2,95642 | 0,00322 | 0,40516 |
| Peak7(B) | A | 490,26788 | 141,35349 | 3,46838 | 5,56711E-4 | 0,38596 |
| | sigma | 0,2267 | 0,07668 | | | |
| | FWHM | 0,53383 | 0,18057 | | | |
| | Height | 862,77316 | 241,07723 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 49,01961 | 0,03848 | 1274,06161 | 0 | 0,04084 |
| | w | 0,44948 | 0,07976 | 5,63533 | 2,5633E-8 | 0,40482 |
| Peak8(B) | A | 930,20193 | 140,74564 | 6,6091 | 7,83023E-11 | 0,386 |
| | sigma | 0,22474 | 0,03988 | | | |
| | FWHM | 0,52922 | 0,09391 | | | |
| | Height | 1651,23806 | 242,07829 | | | |

| | | | | | | |
|-----------|--------|------------|-----------|------------|-------------|------------|
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 53,67077 | 0,03483 | 1540,97997 | 0 | 2,93846E-7 |
| | w | 0,44957 | 0,06987 | 6,43408 | 2,34792E-10 | 0,33745 |
| Peak9(B) | A | 1006,71138 | 136,34546 | 7,38353 | 4,53364E-13 | 0,34559 |
| | sigma | 0,22478 | 0,03494 | | | |
| | FWHM | 0,52933 | 0,08227 | | | |
| | Height | 1786,68703 | 239,99796 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 55,22116 | 0,12144 | 454,73253 | 0 | 5,86887E-7 |
| | w | 0,4497 | 0,24361 | 1,846 | 0,06533 | 0,33753 |
| Peak10(B) | A | 288,86703 | 136,36516 | 2,11833 | 0,03451 | 0,34567 |
| | sigma | 0,22485 | 0,1218 | | | |
| | FWHM | 0,52948 | 0,28683 | | | |
| | Height | 512,52366 | 239,93614 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 56,77155 | 0,08695 | 652,89054 | 0 | 3,05998E-7 |
| | w | 0,44988 | 0,17446 | 2,5787 | 0,01013 | 0,33745 |
| Peak11(B) | A | 403,63207 | 136,39077 | 2,95938 | 0,00319 | 0,3456 |
| | sigma | 0,22494 | 0,08723 | | | |
| | FWHM | 0,52969 | 0,20541 | | | |
| | Height | 715,86026 | 239,91832 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 62,0155 | 0,05797 | 1069,69882 | 0 | 0,34356 |
| | w | 0,4578 | 0,12277 | 3,72879 | 2,08473E-4 | 0,60968 |
| Peak12(B) | A | 767,05443 | 176,86205 | 4,33702 | 1,66383E-5 | 0,60396 |
| | sigma | 0,2289 | 0,06139 | | | |
| | FWHM | 0,53902 | 0,14455 | | | |
| | Height | 1336,88054 | 241,40655 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 62,7907 | 0,10285 | 610,53672 | 0 | 0,34364 |
| | w | 0,45734 | 0,21774 | 2,10045 | 0,03606 | 0,60947 |
| Peak13(B) | A | 431,76045 | 176,78664 | 2,44227 | 0,01485 | 0,60402 |
| | sigma | 0,22867 | 0,10887 | | | |
| | FWHM | 0,53848 | 0,25636 | | | |
| | Height | 753,25436 | 241,50219 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 68,21705 | 0,44559 | 153,09474 | 0 | 0,32811 |
| | w | 0,45454 | 0,94589 | 0,48054 | 0,631 | 0,60234 |
| Peak14(B) | A | 97,59068 | 174,05535 | 0,56069 | 0,5752 | 0,59402 |
| | sigma | 0,22727 | 0,47294 | | | |
| | FWHM | 0,53518 | 1,1137 | | | |
| | Height | 171,30692 | 242,32205 | | | |
| | y0 | 230,5 | 15,48661 | 14,88383 | 1,46002E-43 | 0,20466 |
| | xc | 68,99225 | 0,22481 | 306,89353 | 0 | 0,32817 |
| | w | 0,45419 | 0,47705 | 0,95207 | 0,3414 | 0,60224 |
| Peak15(B) | A | 193,22892 | 174,00455 | 1,11048 | 0,26719 | 0,59412 |
| | sigma | 0,22709 | 0,23853 | | | |
| | FWHM | 0,53477 | 0,56169 | | | |
| | Height | 339,44967 | 242,36681 | | | |

Lampiran 4 Mencari Luas Celah dari Semikonduktor TiO_2/ZnO Menggunakan AutoCAD



Lampiran 5 Mencari Luas Celah dari Semikonduktor TiO_2 Menggunakan AutoCAD



Lampiran 6 Pengolahan Data Luas Celah

| No | Luas Celah (μm^2) | |
|-----------|--------------------------------|------------------|
| | TiO ₂ /ZnO | TiO ₂ |
| 1 | 0,3373 | 0,0530 |
| 2 | 0,4402 | 0,0931 |
| 3 | 0,1807 | 0,1146 |
| 4 | 0,2503 | 0,2655 |
| 5 | 0,7195 | 0,0389 |
| 6 | 0,2041 | 0,0286 |
| 7 | 0,3574 | 0,0229 |
| 8 | 0,2864 | 0,1665 |
| 9 | 0,2899 | 0,0511 |
| 10 | 0,8584 | 0,1097 |
| 11 | 0,3877 | 0,0612 |
| 12 | 0,3614 | 0,0610 |
| 13 | 1,1356 | 0,0977 |
| 14 | 0,3918 | 0,1885 |
| 15 | 1,3097 | |
| 16 | 0,5600 | |
| 17 | 0,2616 | |
| 18 | 1,4159 | |
| 19 | 0,8322 | |
| Jumlah | 10,5801 | 1,3523 |
| Rata-rata | 0,5568 | 0,0966 |

Lampiran 7 Data Hasil Uji Solar Simulator

| Tegangan (mV) | Arus (mA/cm^2) | |
|---------------|----------------------------------|------------------|
| | TiO ₂ /ZnO | TiO ₂ |
| 0 | 0,932806 | 0,800765 |
| 10 | 0,928313 | 0,762829 |
| 20 | 0,924762 | 0,733305 |
| 30 | 0,921094 | 0,704081 |
| 40 | 0,916768 | 0,677037 |
| 50 | 0,913055 | 0,651733 |
| 60 | 0,911579 | 0,627287 |
| 70 | 0,908641 | 0,604791 |
| 80 | 0,904277 | 0,582719 |
| 90 | 0,899268 | 0,562541 |
| 100 | 0,894398 | 0,543151 |
| 110 | 0,88884 | 0,522973 |
| 120 | 0,882601 | 0,504918 |
| 130 | 0,875986 | 0,490214 |
| 140 | 0,868722 | 0,47652 |
| 150 | 0,86174 | 0,463515 |
| 160 | 0,855042 | 0,451161 |
| 170 | 0,847526 | 0,439255 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| 180 | 0,83868 | 0,427768 |
| 190 | 0,830608 | 0,415914 |
| 200 | 0,822638 | 0,402651 |
| 210 | 0,812421 | 0,387831 |
| 220 | 0,799049 | 0,373587 |
| 230 | 0,785336 | 0,358988 |
| 240 | 0,77111 | 0,345119 |
| 250 | 0,756724 | 0,330191 |
| 260 | 0,742437 | 0,315726 |
| 270 | 0,725037 | 0,300386 |
| 280 | 0,707391 | 0,285254 |
| 290 | 0,688722 | 0,269185 |
| 300 | 0,665887 | 0,253672 |
| 310 | 0,636982 | 0,236834 |
| 320 | 0,614185 | 0,220063 |
| 330 | 0,588918 | 0,202569 |
| 340 | 0,56426 | 0,184862 |
| 350 | 0,538079 | 0,166084 |
| 360 | 0,507361 | 0,146717 |
| 370 | 0,474685 | 0,126751 |
| 380 | 0,439707 | 0,106186 |
| 390 | 0,399503 | 0,085297 |
| 400 | 0,35251 | 0,063669 |
| 410 | 0,293341 | 0,041414 |
| 420 | 0,252881 | 0,01837 |
| 430 | 0,20721 | -0,00496 |
| 440 | 0,180126 | -0,02896 |
| 450 | 0,15083 | -0,05425 |
| 460 | 0,112483 | -0,07988 |
| 470 | 0,067953 | -0,10641 |
| 480 | 0,016839 | -0,13368 |

Lampiran 8 Spesifikasi TiO₂ Sigma-Aldrich

SIGMA-ALDRICH
3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA
Website: www.sigmaaldrich.com
Email USA: techserv@sigmaaldrich.com
Outside USA: eurotechserv@sigmaaldrich.com

Product Specification

Product Name: Titanium(IV) oxide - nanopowder, 21 nm particle size (TEM), ≥99.5% trace metals basis
Product Number: 718467
CAS Number: 13463-67-7 TiO₂
Formula: O₂Ti
Formula Weight: 79.87 g/mol

| TEST | Specification |
|----------------------------------|--|
| Appearance (Color) | White |
| Appearance (Form) | Powder |
| Surface Area (m ² /g) | 35 - 65 |
| pH | 3.5 - 4.5 |
| HCl Content | ≤ 0.30 % |
| Loss on Drying | ≤ 1.50 % |
| CP Major Analysis | Confirmed |
| Confirms Ti Component | ≥ 5000.0 ppm |
| Trace Metal Analysis | Meets Requirements |
| Purity | > = 99.5% Based On Trace Metals Analysis |

Specification: PRD.2.ZQ5.10000017835

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms